

SÉRIE A, N° 903

N° d'ORDRE :

927

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

Emile LEIPP

1^{re} THÈSE. — “ LES PARAMÈTRES SENSIBLES DES INSTRUMENTS
A CORDES ”.

2^e THÈSE. — *Propositions données par la Faculté :*

“ L'ÉTUDE AU SPECTROGRAPHE ACOUSTIQUE DES SIGNAUX
ÉMIS PAR LES ANIMAUX ”.

Soutenues le 20 Mai 1960 devant la Commission d'examen.

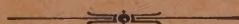
MM. FOCH,

Président.

R. LUCAS

SIESTRUNCK

Examineurs.



SERIE A, N° 903
N° D'ORDRE:
927

T H E S E S

présentées

A LA FACULTE DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITE DE PARIS

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

par

Emile L E I P P

I^{re} T H E S E : " Les Paramètres sensibles des instruments à cordes ".

2^e T H E S E : PROPOSITIONS DONNEES PAR LA FACULTE
" L'étude au Spectrographe acoustique des signaux
émis par les animaux ".

Soutenues le 20 Mai 1960 devant la Commission d'examen.

MM. FOCH , Président.

R. LUCAS }
SIESTRUNCK } Examineurs.



LES PARAMETRES SENSIBLES

DES INSTRUMENTS A CORDES

TABLE DES MATIERES

—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—

CHAPITRE I

=====

INTRODUCTION

A) POSITION DU PROBLEME :

- | | |
|-------------------------------------|-----|
| a) le problème physique | I/1 |
| b) le problème psycho-physiologique | I/3 |

B) TRAVAUX ANTERIEURS :

- | | |
|---------------------------|-----|
| 1) l'excitation | I/5 |
| 2) l'analyse des spectres | I/5 |
| 3) les transitoires | I/6 |
| 4) les courbes de réponse | I/8 |
| 5) étude des matériaux | I/9 |

CHAPITRE II

=====

STRUCTURE PHYSIQUE DU VIOLON - SON EVOLUTION

I^a) TERMINOLOGIE

II/1

2^a) PROPRIETES GENERALES ET PHYSIQUES DU VIOLON

II/3

- | | |
|--|-------|
| a) dimensions - tessiture | II/3 |
| b) statique du violon | II/5 |
| c) mécanisme de l'amplification | II/I3 |
| d) mécanisme de la synthèse du spectre | II/I7 |

CHAPITRE III

=====

A) <u>LES CORDES, ORGANES VIBRANTS.</u>	III/I
1) modes vibratoires d'une corde isolée	III/2
2) mode de transmission et d'amplification des mouvements vibratoires de la corde montée sur instrument	III/5
B) <u>ETUDE THEORIQUE DES VIBRATIONS</u>	III/7
1) rappel des formules de base	III/7
2) équations d'équarrissage	III/I2

CHAPITRE IV

=====

<u>ETUDE EXPERIMENTALE DES CORDES ET INSTRUMENTS</u>	IV/I
1 ^a) <u>Technique de mesure</u>	IV/I
2 ^a) <u>Etude des cordes destinées à divers types d'instruments</u>	IV/2
3 ^a) <u>Influences diverses sur les facteurs sensibles</u>	IV/7

CHAPITRE V

=====

L'INSTRUMENT DE MUSIQUE ET LE SIGNAL MUSICAL SPECTRES ET FORMANTS

1 ^a) <u>L'instrument, système complexe de résonateurs</u>	V/I
2 ^a) <u>L'excitation</u>	V/4
3 ^a) <u>Etude expérimentale des spectres relevés au sonagraphe</u>	V/7
4 ^a) <u>L'appréciation de la qualité d'un instrument de musique</u>	V/I2
5 ^a) <u>Extension aux autres instruments</u>	V/I4

CHAPITRE VI

=====

<u>CRITIQUE DES RESULTATS PRECEDENTS ET CONCLUSIONS</u>	VI/I
---	------

I N T R O D U C T I O N

o _ o _ o _ o _ o _ o _ o _ o _ o _ o

A) POSITION DU PROBLEME

=====

a) LE PROBLEME PHYSIQUE :

Les instruments de musique traditionnels sont pour une large part le fruit de l'empirisme. S'ils n'ont pas été conçus par des physiciens, ceux-ci y ont cependant trouvé l'occasion d'appliquer un certain nombre de lois physiques, ce qui les a conduits à des études fragmentaires sur leur fonctionnement.

Une des plus vieilles expériences de la physique, celle de la division d'une corde en rapports de longueurs simples, remonte à Pythagore. Mais les grecs semblent s'être préoccupés surtout de trouver une explication aux gammes; leurs spéculations sont plus métaphysiques que physiques et leurs instruments de musique étaient, en tout état de cause, assez primitifs et sommaires.

Les études faites sur les instruments de musique depuis cette époque ont trop souvent un caractère anecdotique. Les premiers documents précis sont purement descriptifs (MUSICAGETUTSCH de VIRDUNG, 1511; SYNTAGMA de PRAETORIUS, 1618). MERSENNE (1636), sous l'influence probable de Descartes et de Galilée, aborde enfin le problème en physicien. SAVART (1819) semble le premier avoir fait une étude systématique d'un instrument -le violon- en procédant selon la vraie méthode expérimentale. A sa suite, quelques physiciens et chercheurs ont étudié les instruments à archet (l'ingénieur CHANOT, CHARRON), BOUASSE, le Dr. CHENANTAIS, GREILSAMER etc; mais en fait on n'a pas abouti à une doctrine suffisamment cohérente et générale.

La science acoustique a fait depuis 25 ans des progrès considérables; depuis l'apparition de l'oscillographe et du tube amplificateur en particulier. L'oscillographe matérialise les ondes sonores en les rendant

NOTE : Les textes indiqués dans la bibliographie sont en ordre alphabétique des auteurs; quand il y a plusieurs textes du même auteur, ils sont référés par numéros.

accessibles à l'analyse (développement de Fourier), alors qu'auparavant les ondes restaient immatérielles (flammes etc). Avec l'amplificateur, il n'y a plus de phénomènes petits, et on peut s'y fier quoique l'oreille soit souvent plus sensible. L'acoustique s'est renouvelée avec la naissance de l'électro-acoustique, et les propriétés de l'oreille ont été mesurées avec précision, autorisant un raccordement sans ambiguïté entre phénomènes physiques et sensation; on peut tirer de l'enregistrement des conclusions qui sont valables pour l'oreille et inversement.

L'importance sans cesse croissante de la musique enregistrée et des télécommunications, nécessitant une connaissance de plus en plus approfondie du signal musical a conduit quelques chercheurs à s'intéresser aux instruments de musique. Plus récemment encore, l'enregistrement sur disque et sur bande magnétique a fait réaliser un nouveau pas à la science acoustique en permettant la conservation du témoignage sonore et la comparaison des sensations auditives qui restait le principal point de divergence entre expérience physique objective et résultats subjectifs.

L'acoustique instrumentale est une branche de l'acoustique appliquée; elle a un but autonome: celui de connaître le fonctionnement des instruments. La physique nous fournit les équations de fonctionnement des corps sonores; il s'agit d'établir à partir de celles-ci les équations d'équarrissage des instruments. Exemple: à partir des formules des cordes, il faut déterminer les dimensions d'une corde vibrante pour avoir telle ou telle propriété sonore. Ce sera l'objet de ce travail de proposer, sur la base de l'étude d'un instrument très connu, le violon, des paramètres sensibles de la construction de celui-ci et d'étendre les résultats de cette étude à d'autres instruments voisins. Ces paramètres constituent les éléments des équations d'équarrissage: ils déterminent donc en définitive, les propriétés de l'important "canal de communication" que constituent les instruments de musique.

Un développement lointain de cette étude est d'étendre à l'ensemble des instruments de musique la doctrine établie sur la base des instruments à cordes. Nous avons concentré nos efforts sur le violon pour les raisons suivantes :

a) Le violon est le cas le plus parfait, le plus achevé, le mieux stéréotypé d'une famille d'instruments (alto, violoncelle, contrebasse etc) qui se ressemblent étroitement. Il n'a pratiquement subi aucune

modification de dimensions ou de forme depuis quatre siècles, malgré d'innombrables tentatives pour le perfectionner. Il représente donc une sorte d'aboutissement technique, et est intéressant à étudier pour cela. Il est le résultat d'une graduelle épuration ayant conduit à une sorte d'asymptote de l'évolution où tous les paramètres ont acquis leur valeur optimum dans un système d'interactions très complexe. Il est l'instrument à archet type.

b) Une somme considérable de travaux a été faite sur cet instrument qui a excité la curiosité des chercheurs du fait des multiples incidences commerciales qu'avaient un certain nombre d'affirmations d'exécutants ou de luthiers, dépourvues de contrôle expérimental. On bénéficiait donc d'études précises sur des points particuliers, c'est à dire d'une base de départ.

c) Nous nous trouvons avoir pratiqué le violon en tant qu'instrumentiste depuis plus de 20 ans, et par conséquent être à même de juger d'expérience directe de tous les facteurs relatifs au jeu.

d) Enfin nous possédons une expérience précise de luthier et de fileur de cordes, ayant construit une quarantaine d'instruments et fait sur les cordes une étude systématique continue depuis plus de dix ans.

b) LE PROBLEME PSYCHO-PHYSIOLOGIQUE :

Les instruments de musique sont destinés à transmettre des messages entre humains; ils ne sont qu'un élément dans la chaîne de transmission du signal sonore. Celle-ci comprend: le cerveau émetteur du message, les muscles de l'instrumentiste (mains, pieds, lèvres, langue etc), l'instrument, les conditions d'audition (température, hygrométrie, salle etc), l'oreille de l'auditeur et finalement le cerveau récepteur. La chaîne ne fonctionne efficacement que si les chaînons sont bien adaptés les uns aux autres: en bref un instrument de musique n'a de sens que par rapport à l'anatomie et la psycho-physiologie humaines. La physique des instruments de musique ne peut être définie, en particulier, que par rapport aux propriétés de l'oreille humaine et aux processus d'intégration qui se déroulent entre oreille et cerveau.

Deux points importants sont à considérer: la non-linéarité de l'oreille et l'existence de phénomènes subjectifs relevant de processus

d'autocorrélation qui se passent dans le cerveau.

1) Non-linéarité de l'oreille: elle se traduit par les courbes d'isotonie de FLETCHER et MUNSON. Pour des raisons pratiques d'exécution instrumentale il est nécessaire d'obtenir entre les diverses notes d'un instrument un niveau sensiblement constant. Un instrument de musique ne peut donc être simple ou symétrique; ainsi les cordes d'un piano sont de longueur et de masse linéique différentes: plus la fréquence d'accord de la corde s'écarte de la zone de maximum de sensibilité de l'oreille, plus la corde est longue et plus sa masse linéique est forte; la loi de croissance correspond aux modifications de la sensibilité de l'oreille avec la fréquence. Autre exemple: si on considère le violon et le violoncelle, accordés à la douzième, instruments qui se sont imposés à l'usage, on constate qu'il n'existe aucune relation métrique ou formelle entre eux: leur taille n'est pas inversement proportionnelle à leur fréquence et ils ne sont pas géométriquement semblables. La physique seule ne peut expliquer cette anomalie apparente; c'est la loi de sensibilité qui donne la clef du problème. Ceci est une des causes du malentendu séculaire qui oppose encore actuellement luthiers, musiciens et physiciens.

2) Phénomènes subjectifs. Des musiciens les ont observés depuis les temps les plus anciens. On a tenté de les expliquer par la non-linéarité de l'oreille, mais on peut démontrer expérimentalement que les distorsions ne peuvent apparaître aux niveaux utilisés dans la musique (MEYER-EPPLER). Plusieurs chercheurs ont montré qu'en coupant graduellement un spectre en commençant par le fondamental et les harmoniques inférieurs, la sensation de fondamental subsiste. SCHOUTEN a montré que ce fondamental subjectif provient du résidu du spectre et l'appelle "résiduel". D'autres chercheurs (MEYER-EPPLER, WINCKEL 5) ont étudié ce phénomène. Il est apparu que deux sons primaires émis simultanément engendrent un son subjectif dont la fréquence est égale au plus grand commun diviseur des deux sons primaires. LICKLIDER a expliqué ce phénomène par un processus d'autocorrélation dans les fonctions cérébrales. Nous avons vérifié nous-même qu'on peut supprimer une grande partie du spectre d'un violon, en commençant par le bas, le haut ou le milieu sans que la sensation de fondamental disparaisse. Ainsi donc les éléments déterminés par la série de Fourier ne sont pas suffisants pour traduire la réalité sonore: la frontière entre objectif et subjectif devient

évanescence, car en musique ce n'est pas l'oreille qui est à l'extrémité de la chaîne de transmission, mais l'individu entier avec son cerveau et sa mémoire. L'acoustique instrumentale pose donc des problèmes ne relevant pas exclusivement de la physique proprement dite, et ne pouvant recevoir de solution purement mathématique: c'est une science typiquement expérimentale.

Enfin dans l'écoute des instruments la notion de "zone sensible" de l'oreille, mise en évidence par plusieurs auteurs (MOLES 3), joue un rôle essentiel, car cette zone (300-3000 Hz environ) apparaît comme véritablement privilégiée dans le travail de reconstitution qu'effectue l'oreille. C'est le milieu de la gamme acoustique, dont la théorie de l'information montre qu'elle possède la plus grande densité de seuils différentiels (MOLES 2).

B) TRAVAUX ANTERIEURS

=====

Considérant comme connus les travaux sur les cordes et instruments (Mersenne, Helmholtz, Coulomb, Young, Savart etc) qui sont désormais incorporés dans les traités d'acoustique courants, nous rappellerons ici simplement les travaux plus récents et plus spécifiques :

1^a) L'EXCITATION. CHARRON a étudié les phénomènes fondamentaux relatifs à l'excitation d'une corde par un archet: amplitude de la vibration en fonction de la vitesse de défilement et de la pression de l'archet; variations du frottement avec la vitesse pour des surfaces colophanées; dissymétrie du mouvement des points de la corde, etc. Il a montré que le déplacement relatif d'une corde excitée par un archet colophané affecte une forme vibratoire sensiblement en dent de scie. BLADIER (1,3,4,5) a confirmé ces résultats. Les résultats sont incomplets car ces deux auteurs ont utilisé pour l'excitation un archet tournant (roue en cuivre, en ébonite) dont la jante colophanée frotte la corde. On montrera plus loin que les phénomènes varient considérablement quand on utilise l'archet classique (mèche en crin tendue sur une baguette): la forme du fuseau est plane avec une surface rigide d'excitation; elle ne l'est plus avec une mèche souple.

2^a) ANALYSE DES SPECTRES EN REGIME PERMANENT. De nombreux auteurs ont relevé des spectres d'instruments en régime permanent. On utilise une technique de filtrage; pour obtenir un son continu, on réalise une boucle

fermée à partir d'un enregistrement magnétique ou un archet continu (roue de vielle, ruban continu en parchemin etc).

On peut faire les critiques suivantes :

a) On sait que le mode d'excitation joue un rôle considérable dans la forme du spectre; comme on le verra, le mode de vibration est très différent selon que l'on attaque la corde avec un archet continu ou un archet classique normal; d'autre part la moindre variation de place, de vitesse, de pression de l'archet entraîne d'importantes modifications du spectre continu. Ce dernier est essentiellement fluctuant dans la pratique instrumentale.

b) L'étude expérimentale des spectres d'un grand nombre de violons au sonagraphe nous a montré qu'on ne peut en toute rigueur parler de spectre sonore d'un violon, ni même de spectre d'une corde de violon. D'une note à l'autre, le spectre change complètement de forme et une même note produite sur deux cordes différentes ne possède pas du tout un spectre identique. Cependant si le son d'un violon est reconnaissable en soi (point qui n'est d'ailleurs pas complètement établi) c'est donc qu'il doit exister un certain nombre d'éléments fixes dans tout l'ensemble des spectres que l'on peut relever. La seule méthode applicable est celle des variations concomitantes qui permet de dégager certaines règles générales.

En bref, le spectre continu ne suffit pas à caractériser un instrument. Dans le violon, les variations sont tellement nombreuses et fluctuantes qu'il est impossible d'en faire une étude complète et rigoureuse.

Nous verrons qu'on a obtenu de meilleurs résultats en utilisant les données récentes de la psychologie de l'audition; en effet POTTER a établi, principalement sur la parole, que la perception auditive semblait faire une exploration de la courbe enveloppe du spectre. Des travaux faits au sonagraphe en collaboration avec MOLES ont montré, en effet, une étroite corrélation entre la forme de la courbe enveloppe et la sensation auditive: le timbre d'un violon est un phénomène psychologique, en corrélation avec un phénomène physique: L'étude du spectre doit donc participer de la psycho-acoustique.

32) ETUDE DES TRANSITOIRES : Les transitoires ont fait l'objet

de nombreuses études qui ont montré le rôle important joué par l'amorce et l'extinction du son sur l'appréciation du rendement acoustique d'un instrument de musique. On a étudié la durée et la forme des transitoires.

a) Durée : Pour des instruments mélodiques tels que le violon, il est indispensable que la durée du transitoire d'attaque soit inférieure à la constante de temps de l'oreille (50 ms), sans quoi les passages et traits musicaux rapides dégénèrent en fouillis (WINCKEL I et 2, BACKHAUS). L'étude des phénomènes transitoires a montré que les fluctuations importantes de durée peuvent être enregistrées, même quand les conditions opératoires sont normalisées (BLADIER 6); à plus forte raison trouve-t-on dans le jeu normal des instruments des fluctuations encore bien plus considérables, provenant des modifications continues des conditions d'excitation de la corde (vitesse de défilement, pression de l'archet sur les cordes, qualité de la colophane, manière d'attaquer la corde: graduelle ou brutale etc). On ne peut donc guère tirer de conclusions à partir des mesures en valeur absolue de la durée des transitoires: les paramètres en cause sont nombreux et difficiles à étudier isolément; il est impossible de parler de "la durée des transitoires d'un violon" ou d'un autre instrument, puisque celle-ci varie dans de larges proportions avec les fluctuations de la technique instrumentale.

b) La forme des transitoires. Il est connu que les transitoires jouent un rôle considérable en musique. Les travaux du Groupe de Musique Concrète (SCHAEFFER-MOLES) ont montré qu'en coupant le début d'un phénomène sonore on causait de ce fait auprès d'un public même musicien d'innombrables confusions sur la nature des instruments. Ces opérations sont particulièrement commodes et précises avec le magnétophone. On a montré aussi (WINCKEL) que l'ordre d'apparition des partiels semble caractéristique du type d'instrument. Un invariant du timbre du violon semble être le "coup d'archet". Bien qu'il soit connu que la musique se compose surtout de transitoires (MOLES 3, PIMONOV), il semble que les études faites soient insuffisantes.

En fait l'étude des transitoires participe de deux modes d'approche. Dans le premier on fait des relevés (courbes enveloppe, spectres etc) et l'on cherche à dégager les paramètres et éléments significatifs; l'autre mode d'approche consiste à éprouver par des tests sur des sujets

si le phénomène reste caractéristique du son du violon par exemple, en supprimant les attaques, donnant ainsi un sens à l'expression "son du violon".

4^a COURBES DE REPONSE des instruments. La méthode consiste à exciter sinusoïdalement l'instrument en un point donné par un procédé électromécanique ou électrostatique. On enregistre la courbe de réponse en disposant un microphone à une distance normalisée de l'instrument ou en utilisant un détecteur également électrostatique ou électrodynamique qui relève la vibration en un autre point préalablement métallisé de l'instrument.

On possède des courbes de réponse d'un grand nombre d'instruments, établies en particulier par MEINEL (1), LOTTERMOSER (2), PASQUALINI (1), BLADIER (7). On a étudié les variations de la courbe de résonance avec un certain nombre de paramètres par la méthode des variations concomitantes. Par exemple on a relevé les courbes de résonance en remplaçant une table de violon par une autre dont le bois avait des propriétés différentes (PASQUALINI 1). On a étudié aussi les modifications des courbes de résonance avec les épaisseurs des tables (PASQUALINI 3, MEINEL 4) avec le vernis (MEINEL 3), avec l'humidité (ARNS) etc. On a tenté d'utiliser des courbes de résonance comme critère de qualité sonore des violons.

Cette méthode appelle quelques réserves:

a) Les courbes de résonance varient considérablement avec le point choisi pour l'excitation. Si ce point est le point normal d'excitation (pieds du chevalet), on est obligé de démonter les cordes de l'instrument (PASQUALINI), ce qui modifie totalement ses propriétés du fait de la suppression des contraintes normales qu'il subit. D'autre part, du fait de la dissymétrie interne du violon, il n'est pas indifférent de choisir le pied gauche ou le pied droit comme point d'excitation: il faudrait au moins relever les courbes en ces deux points.

b) Si la prise de son est faite par microphone normal linéaire, il faut veiller à normaliser distance et orientation du microphone par rapport à l'instrument en raison du pouvoir directionnel très marqué de celui-ci. Si par contre on relève la vibration par détecteur en

un point de la table, les courbes obtenues diffèrent radicalement: l'abondance des renseignements est telle que tout dépouillement devient difficile.

c) La "gamme sensible" de l'oreille est située entre 500 et 3000 Hz; c'est donc cette gamme qui doit être incluse essentiellement dans les enregistrements; ce n'est pas toujours le cas (BLADER 7 arrête ses enregistrements à 300 Hz). Certains auteurs ont couvert cette gamme (MEINEL, PASQUALINI) et on voit que les résonances des violons s'étalent jusqu'à des fréquences très aiguës (8000 Hz): il est donc essentiel dans toutes ces études de parcourir toute la gamme acoustique; mais on se trouve devant des courbes très riches en résonances qu'il devient difficile de dépouiller, d'autant plus que la moindre modification des conditions d'excitation ou de prise de son entraîne des bouleversements énormes dans ces courbes; il n'est pas jusqu'à la manière de fixer l'instrument pour l'expérimentation qui n'ait une influence considérable sur les résultats (ARNS). Ici encore on est conduit à se demander quels sont les invariants présentant une importance du point de vue psycho-acoustique.

En bref, on peut reprocher à la méthode des courbes de réponse de ne pas étudier l'instrument dans les conditions normales d'utilisation et de le considérer comme un simple résonateur; les résultats sont extrêmement complexes (une centaine de pointes de résonance notables entre 50 et 6000 Hz) et leur signification exacte est mal précisée.

5^a ETUDE DES MATERIAUX : L'expérience a montré que le rendement acoustique d'un instrument de musique est lié aux paramètres physiques des matériaux constitutants. D'où l'idée d'étudier ces paramètres à l'aide de techniques utilisées dans l'industrie (détermination de la densité, du module d'élasticité, du module de rigidité, de la capacité d'amortissement etc). Le problème est ici particulièrement complexe, car on utilise traditionnellement en lutherie du bois, matériaux fibreux, anisotrope, jamais identique à lui-même, sensible à l'hygrométrie, au vieillissement etc, et par suite difficile à étudier.

ROHLOFF étudie l'effet du frottement interne des bois sur le son des instruments et conclut que la qualité des instruments anciens provient du faible coefficient de frottement interne des bois utilisés.

PASQUALINI en collaboration avec BARDUCCI a fait une étude approfondie de cette question.

Par excitation électrostatique de plaquettes de bois il détermine 6 paramètres: la densité ρ , la vitesse du son V , le module d'Young E , l'impédance caractéristique $\sqrt{\rho/E} = \rho.V$, le coefficient de résonance $Q = \pi/d$ (d =décrément logarithmique), enfin le produit $K = d.\rho.V$, Pasqualini ayant trouvé que ce dernier paramètre est pratiquement indépendant de la direction des fibres et peut être considéré comme le paramètre caractéristique du bois.

Toutes les études faites sur les bois en fonction de leur utilisation dans les instruments de musique sont d'un intérêt considérable; les praticiens sélectionnent leurs bois par des procédés empiriques qu'il est préférable de remplacer par une technique de mesures précise. Mais on ne semble pas avoir réussi à faire la relation précise entre les paramètres mesurés et les qualités sonores des instruments: le vrai problème n'est donc pas résolu. Certains points importants en lutherie, par exemple la résistance à la déformation des bois n'ont fait l'objet que de remarques alusives alors qu'ils méritaient, nous le verrons, une attention particulière.

C) CONCLUSION

=====

Ainsi que nous venons de le voir, la plupart des études concernant les instruments de musique ont un caractère fragmentaire. La première idée qui vient à un physicien est que le son d'un instrument est caractérisé par l'amplitude et le timbre; tel chercheur s'est attaché à un aspect spécial du violon ou de son emploi: il en a dégagé par une série d'expériences une étude partielle, mais aucune doctrine ne semble avoir émergé. D'une façon générale on s'est heurté à l'extrême complexité des phénomènes, des spectres et des courbes de réponse, d'où l'essentiel ne se dégage pas suffisamment de l'accessoire. Il est difficile d'isoler les paramètres sensibles du fait de leurs multiples interactions: on doit les étudier in situ. Ces difficultés sont accrues du fait des variations de matériaux d'un instrument à l'autre: il est impossible de tirer des conclusions à partir de l'étude d'un cas particulier.

L'étude mathématique ne peut servir que de guide doctrinal quant à la façon dont sont liées diverses grandeurs entre elles, et doit rester cantonnée à l'échelle de précision où elle est compatible avec les variations des données. A cette échelle même elle est déjà trop complexe; les conditions théoriques ne sont jamais réalisées dans la pratique et l'expérience montre que les lois déterminées par le calcul deviennent souvent grossièrement erronnées.

En fin de compte la physique des instruments à cordes est mal connue. Les travaux réalisés sont restés trop sommaires et dispersés et de ce point de vue il reste un problème à traiter.

RESUME DE LA PREMIERE PARTIE

-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

1^a) Les recherches de caractère scientifique sur les instruments de musique sont récentes, liées à l'introduction des techniques électro-acoustiques. Il n'existe pas de doctrine générale.

2^a) On a étudié l'excitation par archet colophané tournant, mais avec l'archet normal les résultats sont différents: l'étude est incomplète.

3^a) On a étudié les spectres en régime permanent; leur complexité est extrême: ils varient avec les paramètres physiques des matériaux, la structure de l'instrument et la technique de jeu. Seule la courbe enveloppe du spectre semble être intégrée par le cerveau, d'où nécessité d'une méthode expéditive pour établir ces enveloppes afin de pouvoir se baser sur des statistiques et non sur des cas particuliers.

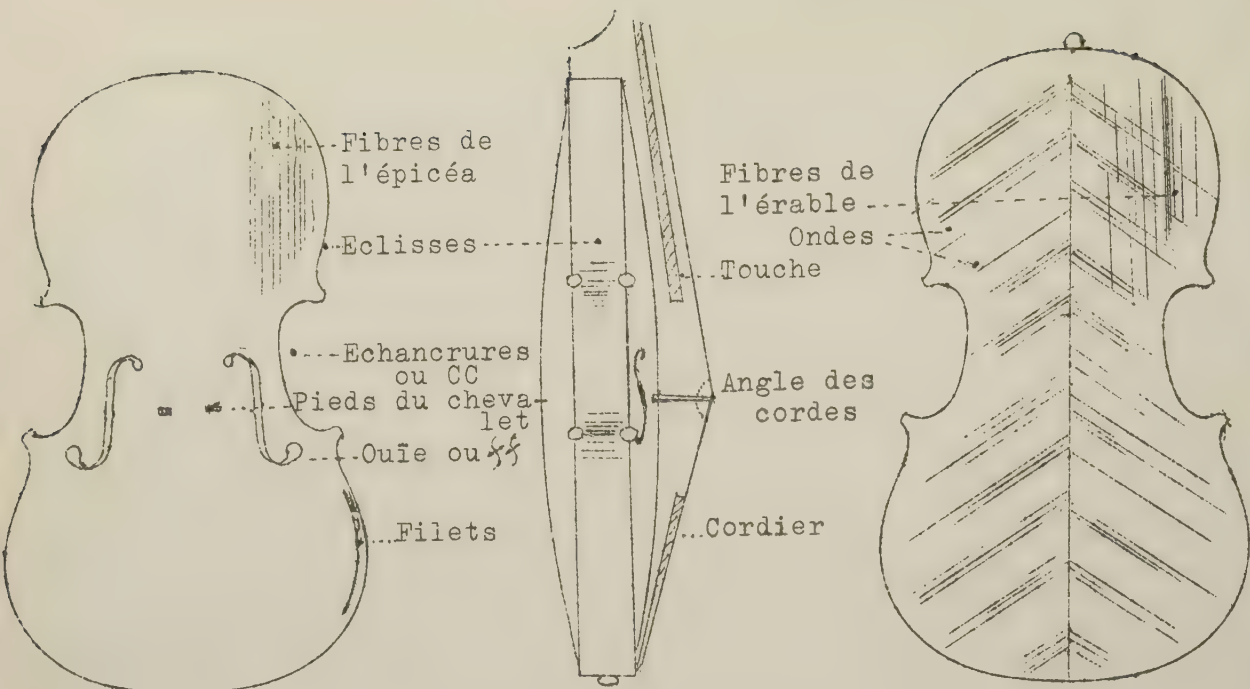
4^a) On a étudié les transitoires: ceux-ci caractérisent le type d'instrument en fonction du mode d'excitation, mais la moindre variation dans le mode d'excitation introduit des modifications profondes de la forme et de la durée du transitoire d'attaque; toute conclusion basée sur des cas particuliers est donc insuffisante.

5^a) On a étudié les courbes de réponse; les conditions expérimentales s'écartent de la pratique habituelle: l'instrument ne se trouve pas dans son état normal; le dépouillement est difficile eu égard à l'extrême complexité des courbes obtenues. L'instrument est considéré comme un simple résonateur, ce qui est insuffisant. Les courbes varient considérablement avec les conditions expérimentales; on ne peut dégager de lois générales à partir de cas particuliers.

6^a) On a étudié les matériaux: particulièrement le coefficient d'amortissement, le module d'élasticité, la vitesse du son, le coefficient de résonance, mais on n'a pas réussi à établir la relation précise entre ces paramètres et le rendement acoustique, la qualité, des instruments.

Ces considérations guident la forme de l'étude que nous proposons ici.

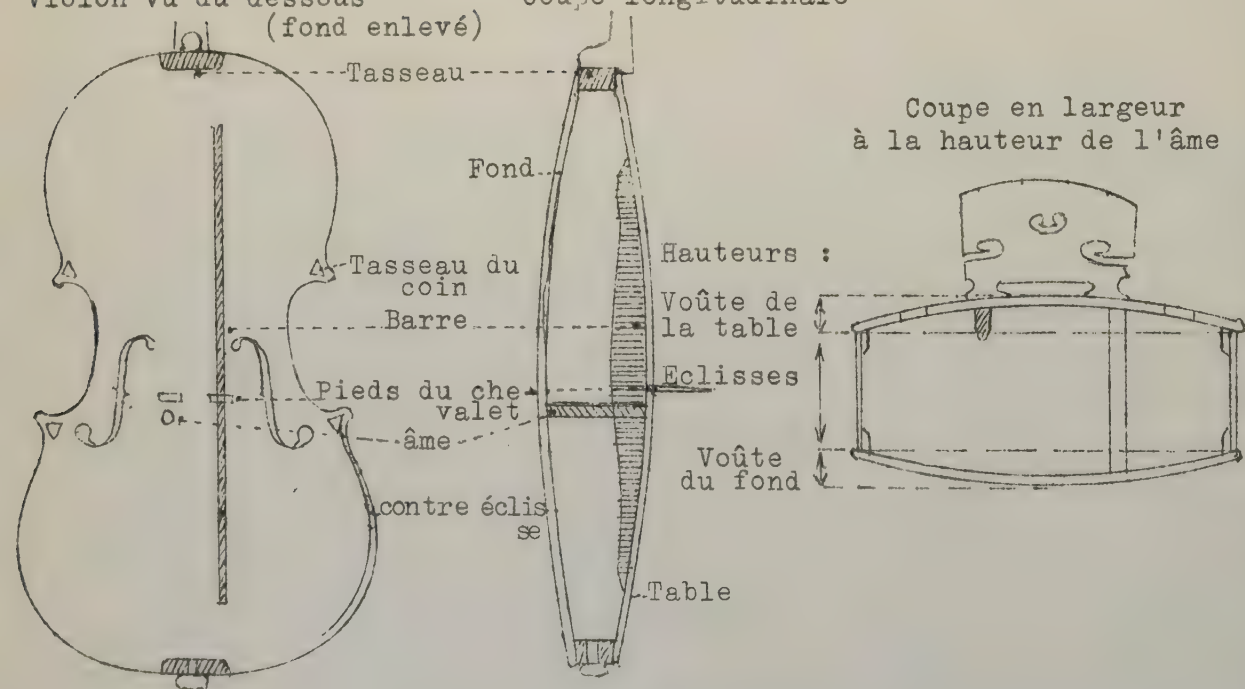
FIG. I



Violon vu du dessous
(fond enlevé)

Coupe longitudinale

Coupe en largeur
à la hauteur de l'âme



STRUCTURE INTERNE

CHAPITRE II.I

STRUCTURE PHYSIQUE DU VIOLON - SON EVOLUTION

I²) TERMINOLOGIE (Fig. I)

Le violon comprend une caisse formée d'une table généralement en épicéa, et d'un fond en érable (exceptionnellement en noyer, peuplier ou chêne). Ces deux parties sont reliées par des planchettes en bois mince (1 à 2 mm) appelées éclisses. A l'une des extrémités de la caisse est enclavé un manche (érable, ou, parfois poirier) à l'extrémité duquel se trouve le chevillier portant 4 chevilles coniques (palissandre ou ébène). Sur le manche est collé une planchette en ébène, la touche à surface bombée; à l'extrémité de la touche est collé le sillet délimitant la longueur vibrante des cordes. Un chevalet en érable ajouré par deux découpures latérales et un coeur repose sur la table par deux pieds distants d'environ 3 cm. Les cordes forment sur le chevalet un angle ouvert à 170° environ et sont fixées en arrière du chevalet à un cordier. La partie de la corde entre le chevalet et le cordier est appelée bout mort. Le manche est fixé dans un tasseau de bois (sapin, peuplier); à l'autre extrémité de la caisse est collé un autre tasseau dans lequel est fixé le bouton auquel s'attache le cordier. Ces deux tasseaux et les 4 tasseaux des coins déterminent des surfaces de collage suffisantes pour assurer la solidité de l'ensemble. L'angle formé par la touche et le plan de la table est appelé renversement; celui-ci est réglé de façon que les cordes soient à une distance convenable de la touche (5 mm du côté du SOL et 3 mm du côté du MI environ) pour des raisons de facilité de jeu.

a) Particularités de la table: La forme générale est composée d'arcs de cercle raccordés, pour des raisons esthétiques: c'est approximativement la forme de l'ove portant deux échancrures latérales destinées au passage de l'archet. La table, voûtée, comporte deux coupures en forme d'F (les FF ou ouïes) qui coupent la table en deux parties solidaires entre les deux trous du haut des FF (distance environ 4 cm); chaque ouïe porte en son milieu une petite incision, appelée cran; les crans matérialisent la position du chevalet sur la table.

A l'intérieur de la table et sous le pied gauche est collée une règle en épicéa (longueur: 27 cm environ, épaisseur: 5 mm, hauteur: décroissant de 15 mm à 2 mm à peu près, depuis le milieu jusqu'aux extrémités): c'est la barre (distante de 15 mm environ de l'axe de symétrie longitudinal de la table). A 3 ou 4 mm en arrière du pied droit du chevalet, une petite tige de bois (sapin) est placée par forcement entre table et fond: c'est l'âme. Les épaisseurs des tables sont de l'ordre de 2 à 4 mm; elles sont souvent égales pour tous les points de la table, ou décroissantes du milieu vers le bord; plus rarement elles croissent du milieu vers le bord. Une table de violon pèse en moyenne de 60 à 75 g. Les bons facteurs règlent empiriquement les épaisseurs en fonction des qualités des bois.

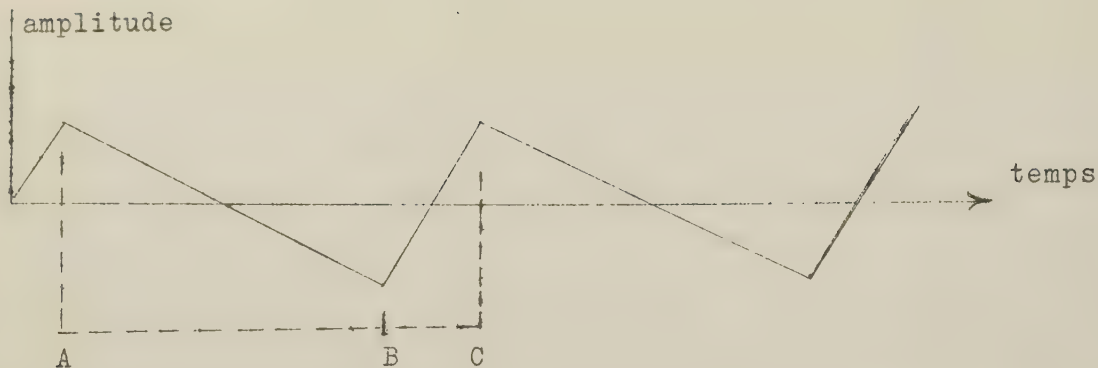
b) Particularités du fond: Le fond, également voûté (flèche 15 mm environ) est toujours plus épais que la table, et les épaisseurs sont toujours décroissantes (maximum: 6 mm au centre, minimum: 1,5 mm aux bords). Il pèse environ 100 à 120 g dans les instruments classiques.

c) Particularités des bois utilisés: Les fibres du bois sont orientées dans le sens de la longueur de l'instrument (table et fond). Le sapin est habituellement coupé "sur maille"; on obtient une table en débitant à partir du coeur de l'arbre une tranche prismatique; cette tranche est refendue suivant le milieu et les deux morceaux sont collés après dressage à la varlope; ainsi obtient-on une table dont les deux parties ont des propriétés identiques, par rapport au joint (collage). On utilise aussi, mais rarement, des tables d'une seule pièce.

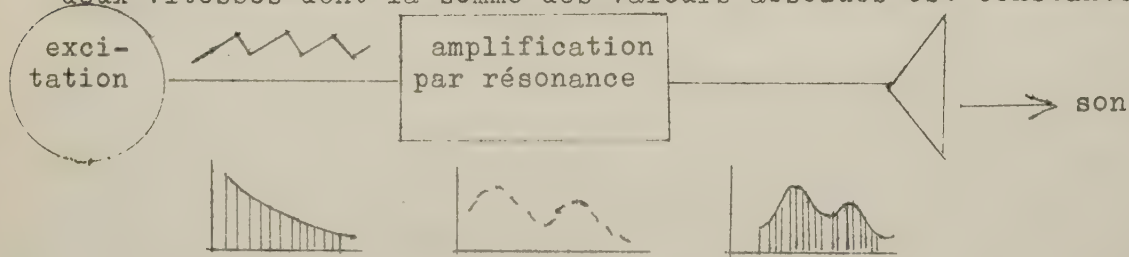
Les fonds sont préparés de la même manière (fibres dans le sens de la longueur, ondes de l'érable dans le sens de la largeur). Ils sont parfois d'une seule pièce. Parfois l'érable est coupé "sur tranche": le tronc est débité en planches, par traits de scie parallèles entre eux; dans ce cas, du fait de la disposition des fibres de bois d'automne, les propriétés élastiques varient d'une planche à l'autre d'un même tronçon; c'est pourquoi on préfère la coupe sur maille.

Les voûtes des tables et fonds sont tirés de la masse par évidage à la gouge; dans les instruments de fabrique à bas prix, les tables sont moulées à chaud à partir de planchettes de quelques mm d'épaisseur; mais les bois sont alors plus ou moins torréfiés et les instruments réalisés ainsi sont habituellement de qualité inférieure (niveau trop

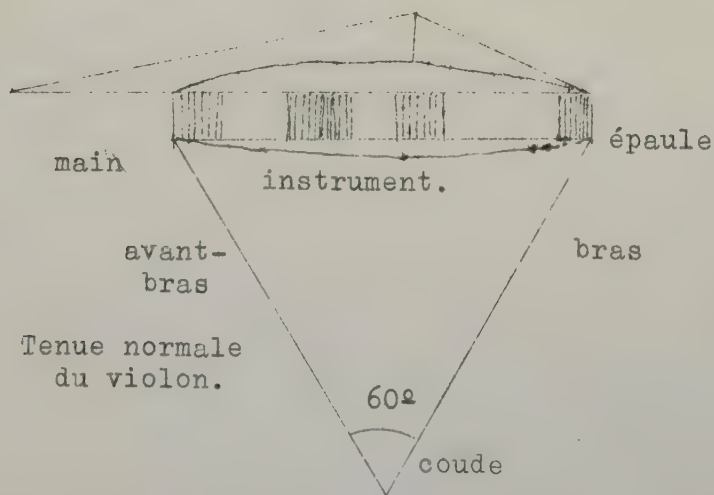
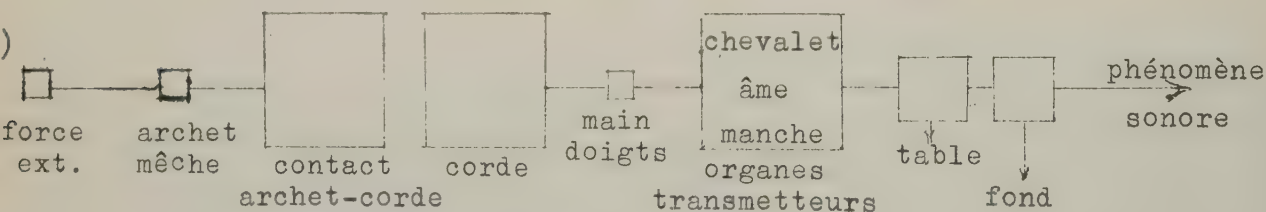
FIG. 2



De A à B la corde se déplace dans le sens de l'archet;
 en B la corde décroche de l'archet;
 de B à C la corde se déplace dans le sens opposé à celui de
 l'archet. - Chaque point de la corde est animé successivement de
 deux vitesses dont la somme des valeurs absolues est constante.



L'excitation fournit un spectre extrêmement riche; l'instrument,
 système de résonateurs, modifie ce spectre de façon caractéris-
 tique pour chaque note.



faible).

II.2) PROPRIETES GENERALES ET PHYSIQUES DU VIOLON:

Un violon est une machine à fabriquer des notes de musique à sons variables. Les travaux classiques de CHARRON ont montré que la force appliquée par l'archet à la corde avait le caractère d'une impulsion périodique en dents de scie du type oscillation de relaxation (Fig. 2 a). Le problème du violon est d'expliquer comment, à partir d'un système très complexe de quadripôles passifs, on transforme cette vibration en un phénomène sonore ayant une forme très largement variable selon les caractéristiques des éléments successifs (Fig. 1 c). Les paramètres se divisent en deux catégories: ceux qui dépendent de l'instrumentiste et ceux qui dépendent de réglages à priori fixes déterminés par le luthier, le facteur d'archets et le fabricant de cordes.

En fait, le violon réalise un compromis entre diverses nécessités également impérieuses; le fait qu'on n'ait réussi ni à améliorer sensiblement l'instrument depuis des siècles, ni à le remplacer montre que ce compromis est viable; il est le résultat d'une longue évolution de caractère empirique. Des générations de facteurs d'instruments ont accumulé un grand nombre de connaissances pratiques dont la justification physique est souvent possible à postériori. Ces connaissances se sont cristallisées petit à petit sous forme d'une tradition dont les luthiers, simples artisans le plus souvent, ont oublié les causes. Mais ils savent - et les innombrables essais infructueux de perfectionnement du violon en témoignent - que la qualité de leurs produits diminue chaque fois qu'ils s'écartent des données traditionnelles. Il est donc intéressant d'examiner les données fournies par l'évolution historique des instruments et de rechercher les causes physiques de celles-ci.

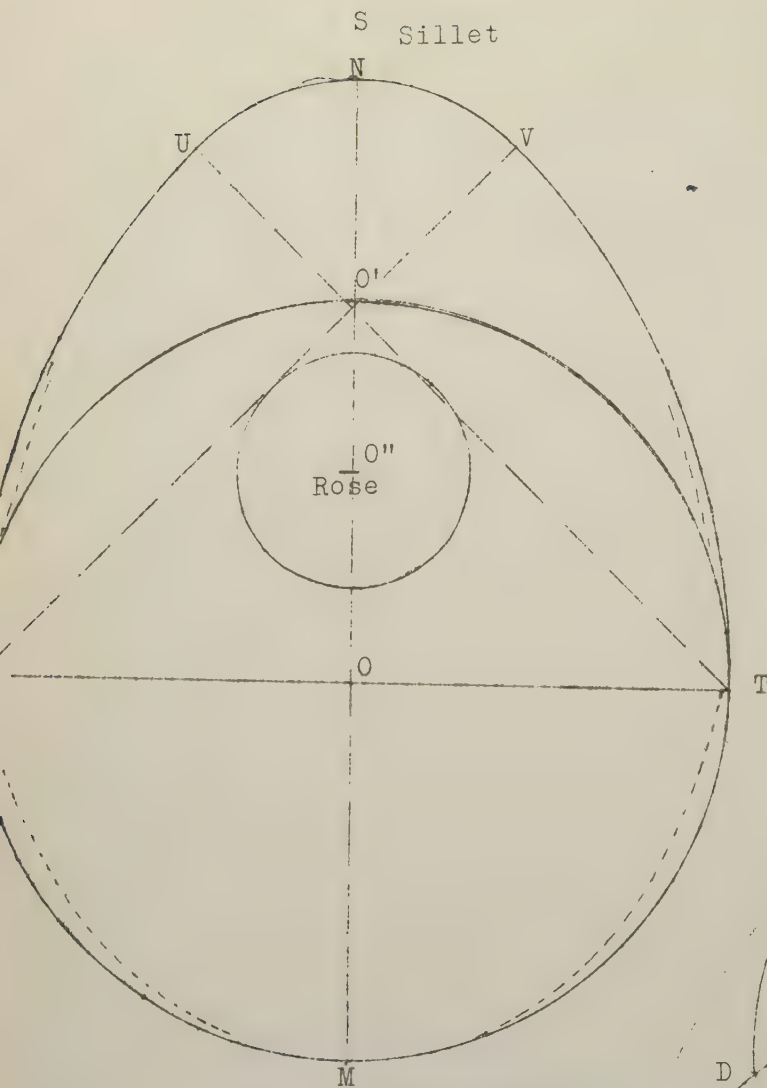
a) Dimensions et tessiture: Dans la famille des instruments à cordes une espèce d'optimum est déterminée à partir du moment où on désire un instrument mobile, maniable et présentant un registre situé dans la gamme de sensibilité optimum de l'oreille telle que nous la proposent les travaux des psycho-physiologistes. Le violon, instrument mélodique par excellence, doit par conséquent être à l'échelle anatomique de l'homme (particularités anatomiques de la main et du bras); pour être maniable,

la solution la plus rationnelle est de tenir l'instrument entre le menton et la clavicule, afin de libérer la main gauche (chargée de modifier la longueur des cordes) et la main droite (chargée de l'excitation des cordes). L'expérience a montré que la position optimum est réalisée quand la caisse de l'instrument a la longueur de l'avant-bras et du bras; en position de jeu, on a ainsi un triangle équilatéral: le coude forme un angle d'environ 60° (Fig. 2 d). L'expérience montre que l'on évite ainsi, au mieux, la fatigue provenant de la tenue de l'instrument. On peut se demander pourquoi la quasi totalité des violonistes utilise la main gauche pour déterminer les notes alors que cette main est naturellement moins habile et que la virtuosité nécessite une grande dextérité. Mais la pratique instrumentale et l'expérience physique montrent que la technique de l'archet est beaucoup plus importante qu'on ne le croit à priori dans le rendement sonore de l'instrument.

Pour des raisons de maniabilité on a fait la caisse la plus petite possible, eu égard aux paramètres anatomiques de la main et des doigts. Mais pour obtenir, avec ces dimensions minima, un rendement acoustique maximum, et plus spécialement un niveau élevé, il faut placer la

NOTA : Il est intéressant de remarquer que les anciens luthiers italiens du 16^e siècle ont apporté la plus grande contribution à l'invention du violon. Or l'unité de longueur était alors dans cette région de l'Italie le "braccio", le "bras" valant 71,14 cm; le "demi-bras", côté du triangle équilatéral idéal est alors 35,6 cm; or c'est là exactement la longueur de la caisse du violon. Il est possible que les spéculations sur les nombres aboutissant à la notion de module, chères aux artistes de la Renaissance Italienne, aient eu leur influence ici.

On sait aussi que le violon était exclusivement utilisé, à l'origine, par des ménestriers ambulants, ce qui explique la nécessité de réduire les instruments à leur taille minimum pour les rendre transportables (PHILIBERT JAMBE DE FER : Epitome Musical des tons, sons et accordz ès voix humaines, fleuste d'Alleman, fleuste à neuf trous, violes et violons LYON 1556).



Tracé géométrique du luth
(14^e siècle)

L'introduction des échancrures, nécessaires pour le passage de l'archet, a modifié la géométrie de l'instrument à cordes. Les tracés régulateurs de la viole ancienne comportent deux chaînettes ABC et DEF raccordées par des arcs de cercle AD et CF. Pratiquement les luthiers s'approchent de la forme théorique en traçant les formes à l'aide d'arcs de cercle raccordés de façon à se rapprocher au mieux de la chaînette. Les tracés géométriques varient avec les écoles.

Le tracé se fait à partir des 5 centres:

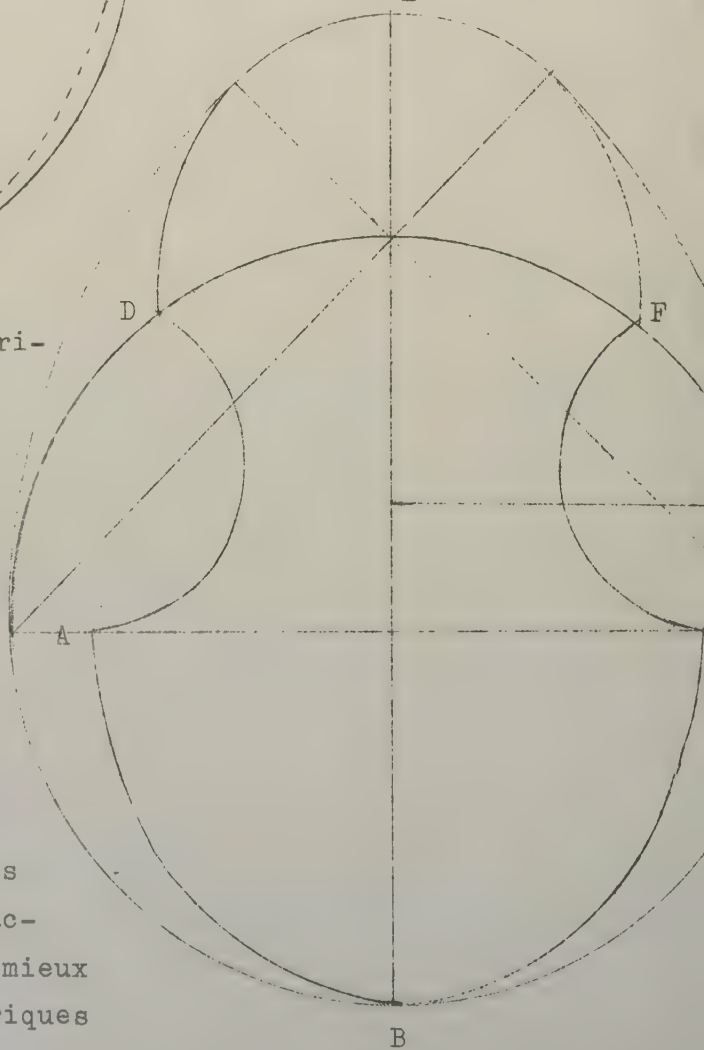
O : (arc RMT)

T et R : (arcs RU-VT)

O' : (arc UNV)

O'' : (rose)

L'ove s'écarte très peu de la forme réalisée par deux chaînettes raccordées (en pointillé).
E



tessiture de l'instrument dans la zone de maximum de sensibilité de l'oreille, telle qu'elle est définie par les courbes de FLETCHER et MUNSON. Le violon utilisé effectivement au mieux cette zone puisque sa tessiture va de 200 Hz à 4000 Hz.

b) Statique du violon-réaction à la déformation: Un instrument à cordes, soumis à des forces parfois considérables, se désaccorde et devient matériellement injouable s'il se déforme. Au fur et à mesure des déformations, son fonctionnement se modifie (perte de niveau et une altération du timbre). Or certains instruments anciens (luths, violes, violons etc) ont subi l'épreuve d'un jeu incessant pendant des dizaines voire des centaines d'années, sans perdre leur qualité, ce qui implique une utilisation remarquable des matériaux et des formes et une connaissance approfondie quoiqu'empirique de la résistance des matériaux. Ainsi des violons de STRADIVARIUS (1648-1737) et d'autres luthiers contemporains ont encore, quand ils n'ont pas été abîmés, un rendement acoustique suffisamment élevé pour inciter des virtuoses à les acquérir moyennant des sommes élevées (de l'ordre du million de Fr. avant guerre). Cela nous incite à préciser les observations relatives à la forme de l'instrument.

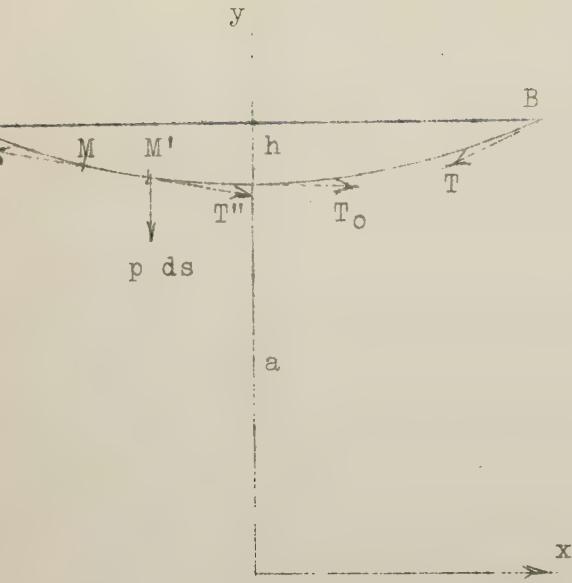
1) Forme générale de l'instrument: L'étude de cette forme relève du domaine de l'ingénieur; c'est un cas particulier de la résistance des matériaux, et les procédés actuels d'étude de ces problèmes (élasticimétrie) pourraient fournir des renseignements précieux. Nous avons fait les observations suivantes :

Parmi les plus anciens documents existants (Manuscrit latin; vers 1400; Bibliothèque Nationale N° 7295), on trouve la méthode de tracé de la forme d'un luth ancien (Fig. 3). Ce tracé est exactement celui de l'ove. L'empirisme a montré depuis longtemps que cette forme, dont les méridiennes sont approximativement des chaînettes, est celle qui permet d'obtenir le maximum de résistance avec le minimum de matière; or c'est précisément ces conditions que l'on cherche à réaliser dans les instruments à cordes; les luthiers savent que le meilleur instrument est celui qui possède la masse la plus faible et le maximum de résistance à la déformation, car ils ont remarqué que la faible masse conditionne une "attaque facile" (c'est à dire un transitoire d'attaque court, permettant

une grande virtuosité). Ils savent aussi que si l'instrument se déforme, il perd ses qualités originelles. Cette forme d'ove, facile à construire géométriquement, s'est conservée à travers les siècles pour les instruments à cordes pincées, et sa persistance doit correspondre à quelque réalité physique. Lors de l'apparition des instruments à cordes frottées (Croisades), et à partir du moment où on a utilisé l'archet et plusieurs cordes sur un même instrument, il est devenu indispensable de prévoir des échancrures pour le passage de l'archet; on a utilisé alors deux chaînettes raccordées par des arcs de cercle, forme que l'on retrouve dans tous les types de violes, avec des variations de style (Fig. 2 b). Les tentatives pour modifier cette forme ont échoué (violon trapézoïdal de SAVART par exemple). L'instrument de Savart fut présenté à l'Académie des Sciences et des Beaux Arts en 1819 (rapporteur BIOT) et, si les conclusions, après audition comparative avec un instrument classique, ont été plutôt favorables, c'est parce que les conditions expérimentales étaient discutables. Si l'instrument n'a pas tenu ses promesses, une des raisons probables est la déformation de la caisse dans le temps, conséquence d'une forme mal appropriée.

24) FORME DES VOUTES: Le même souci semble avoir présidé dès l'origine à l'élaboration de la forme des voûtes du violon. Nous avons relevé la forme de celles-ci pour une trentaine d'instruments anciens célèbres (Fig. 4 b). Ce sont exactement des chaînettes. Le fait n'est certainement pas fortuit: en Italie, depuis l'origine, la barre porte le nom de "catena", c'est à dire "chaîne"; la barre, épousant exactement la forme de voûte de la table, sa semelle a la forme d'une chaînette si la table possède ce type de courbure. L'utilisation systématique de la chaînette par les anciens luthiers n'a rien de surprenant; la chaînette est connue des architectes depuis les temps les plus reculés (puisque les ponts suspendus prennent cette forme naturellement); elle était certainement connue des artistes (au Palais de la découverte on pouvait voir une photographie d'une statue de moine bouddhiste dont le drapé de robe est constitué par une famille de chaînettes); on pourrait multiplier les exemples. Le problème mathématique de la chaînette n'a été résolu qu'en 1691 (Bernoulli); Galilée la prenait pour une parabole: il est certain qu'à l'échelle où on travaille en lutherie, la différence est indiscernable. Quoiqu'il en soit la chaînette a été utilisée avant

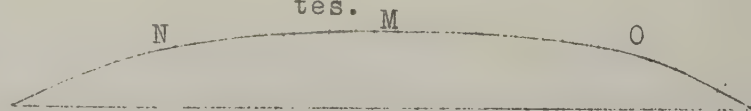
FIG. 4



Cas du violon: on a:
 $T_0 / T = 1,008$; les
 tensions sont partique-
 ment identiques pour les
 flêches faibles.

..... Amati (1658)
 Stradivarius (1710)
 Guarnérius IHS (1717)

Relevés exacts de la forme
 des voûtes de trois instru-
 ments de maîtres: ce sont
 rigoureusement des chaînet-
 tes.



c) Voûte de type STEINER (école allemande)
 elle s'écarte sensiblement de la chaîne
 on a une partie plate NO; les épaisseur
 sont renforcées au centre M.

la solution mathématique du problème, et il n'est pas impossible que l'on ait fait à son sujet des observations empiriques et expérimentales, intéressantes, et justifiées à posteriori par la théorie.

Etant donné l'importance de cette courbe en lutherie, rappelons ici les propriétés de la courbe qui nous intéressent particulièrement dans ce cas.

Par définition, la chaînette est la figure d'équilibre d'un fil homogène, de poids p par unité de longueur, fixé en deux points A et B (Fig. 4 a).

L'équation différentielle de la courbe, bien connue (BRUHAT 10 b) est :

$$y = \frac{d}{2} \left(e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}} \right)$$

Un élément $MM' = ds$ est soumis d'une part à son poids $p ds$ et d'autre part à deux forces de tension appliquées en M et M'; l'élément étant en équilibre, la somme des projections horizontales des trois forces est nulle et la projection horizontale de la force de tension est la même en tous les points du fil.

Le calcul des tensions T_0 au point le plus bas de la chaînette C, et de la tension T au point de fixation B, donne:

$$T_0 = \frac{l^2 - h^2}{2h} p \qquad T = \frac{l^2 + h^2}{2h} p$$

l étant la demi-longueur de la chaînette, h sa flèche.

Comparons ces deux tensions; on trouve :

$$\frac{T}{T_0} = \frac{l^2 + h^2}{l^2 - h^2}$$

Dans l'application qui nous intéresse ici, la flèche est toujours petite par rapport à la longueur. Exemple: coupe longitudinale d'un violon; on a $l = 17,5$ et $h 1,5$; dans ce cas, le calcul donne: $T/T_0 = 1,008$; avec une précision supérieure au $1/100^2$ on peut donc formuler la loi importante qui nous

intéresse ici :

Quand la flèche est faible, tous les éléments de la chaînette sont soumis à une des tensions identiques.

Inversons le problème: au lieu d'un fil prenons une règle plate ayant la forme d'une chaînette et exerçons en A' et B' deux forces de pression dirigées suivant la tangente à la chaînette; pour des flèches faibles, les pressions seront identiques pour tous les éléments de la règle.

Ainsi, si on considère une table de violon formée d'une série de chaînettes raccordées, les forces sont également réparties sur tous les points de la table et de ce fait la déformation est minimum.

Ces considérations théoriques ont été justifiées par une série de vérifications expérimentales:

Les déformations de la caisse d'un violon sont faciles à mesurer: on relève la distance entre l'extrémité de la touche et la table; quand l'instrument se déforme, la touche se rapproche graduellement de la table (jusqu'à la toucher dans les cas extrêmes); la distance moyenne normale est de l'ordre de 10 mm. Nous avons construit une série de 10 violons dont les voûtes étaient constituées par une série de chaînettes (dans le sens longitudinal et transversal). Or ces instruments, après 10 ans d'usage et de tension continue, n'ont subi aucune déformation sensible; d'autres instruments dont la voûte avait une forme très sensiblement différente (Fig. 4 c), se sont déformés rapidement de plusieurs millimètres.

La chaînette possède d'ailleurs une autre propriété géométrique intéressante en lutherie: on sait que le coefficient angulaire de la tangente croît proportionnellement à l'arc compté du point le plus bas. Or, le luthier rabote la forme de ses voûtes à l'aide de rabots à très petite semelle (35 mm); le coefficient angulaire variant régulièrement avec l'écart du sommet de la voûte, cette forme "sort le mieux de la main", instinctivement: le travail matériel est plus facile, ce que l'expérience pratique de lutherie montre bien.

Autre point intéressant: Les luthiers utilisent, pour

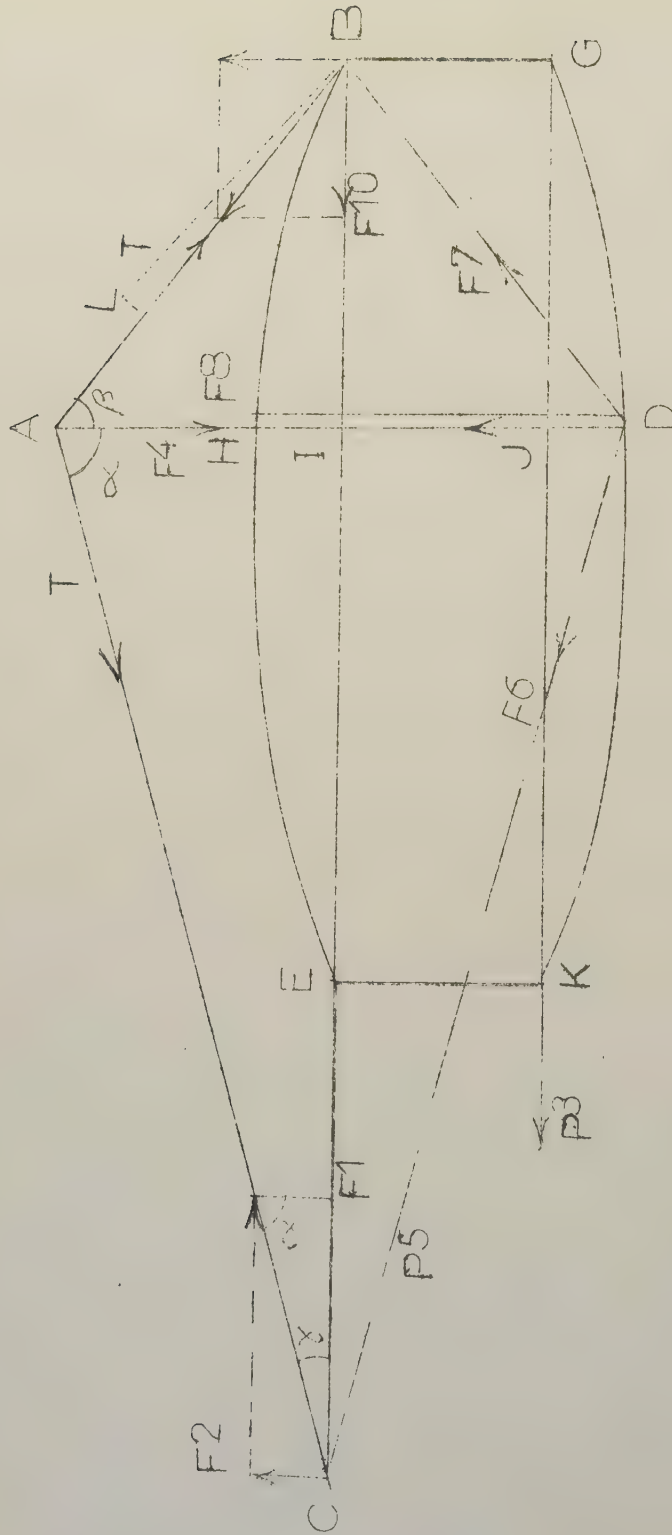
former leurs voûtes, des "gabarits", planchettes minces de bois dont l'une donne le profil longitudinal de la voûte et les trois autres trois sections transversales à peu près équidistantes. Pour réaliser ces modèles, trois courbes pratiques se proposaient aux luthiers : l'arc de cercle, la parabole et la chaînette. L'arc de cercle (rayons de l'ordre du mètre) et la parabole sont relativement difficile à tracer pour un artisan; la solution simple est la chaînette. En effet, une petite chaîne à maillons fins (bijou) étant fixée entre deux points distants de la longueur désirée, on règle la longueur de la chaîne de façon à obtenir la flèche désirée; ainsi peut-on obtenir rapidement toutes les chaînettes voulues. Nous avons utilisé un procédé photographique: la chaînette est tendue sur un papier sensible fixé verticalement; on obtient des courbes qu'il suffit de coller sur une planchette et de découper, pour obtenir les gabarits nécessaires pour former les voûtes.

Nous avons d'ailleurs remarqué que certaines formes de luths ou de mandolines, au lieu d'utiliser le tracé de l'ove, sont constituées de chaînettes raccordées.

Ajoutons une autre observation: certains luthiers ont utilisé, pour leurs voûtes, des profils systématiquement différents de la chaînette (école allemande, Steiner et autres). Les épaisseurs de leurs tables sont alors très fortes au milieu et décroissent graduellement vers les bords; ceci dans le but de compenser les inégalités de tension aux divers points de leurs voûtes. Mais il est bien connu dans le milieu des luthiers que ces instruments sont sujets à des déformations importantes (la touche se renverse vers la table), ce qui confirme l'excellence des procédés utilisés par les luthiers les plus célèbres (Stradivarius, Amati etc) qui ont constamment réalisé des voûtes en forme de chaînette.

On a souvent mis en doute l'utilisation systématique de données précises par les anciens luthiers, sousestimant à tort les connaissances de certains maîtres artisans de la Renaissance, comme des recherches historiques nous l'ont montré. Ceux-ci possédaient de nombreux procédés de traçage et savaient faire certains calculs; il est resté

FIG. 5



quelques outils pour le prouver, par exemple cette règle à calcul ayant appartenu à un luthier contemporain de Stradivarius (FACINI) et portant des graduations arithmétique, géométrique, cubique et permettant de calculer les éléments des polygones (PELUZZI).

3^a) REPARTITION DES FORCES DETERMINEES PAR LA TENSION

DES CORDES: Considérons la coupe d'un violon (Fig. 5). On peut schématiser le système matériel par le quadrilatère régulier CABD et ses deux diagonales: CB et AD.

Le point C délimite la longueur vibrante CA des cordes; le point B est le point de fixation des cordes (par l'intermédiaire du cordier BL).

Le manche CE est dans le plan de la table EIB.

Le chevalet AH s'appuie en H au sommet de la voûte EHB de la table.

Le système matériel CEKDGB (manche+éclisse, +fond+éclisse) peut être assimilé à un système élastique CDB.

La diagonale AD est matérialisée par la somme AH (chevalet) + HD (âme).

Le système CEKDGB (ou CDB) réalise un ressort dont les caractéristiques sont essentiellement déterminées par le fond KDG. Si ce ressort résiste aux déformations sous la tension des cordes, le système est en équilibre: la rigidité du système est grande dans le sens CEB (manche et table travaillant à peu près en bois debout); la rigidité est faible dans le sens AD (vibration transversale de tables minces). Pour un petit déplacement du point A, on a un déplacement identique du point D.

La répartition des forces déterminées par la tension des cordes est fonction de l'angle des cordes sur le chevalet (CAB). La pression exercée normalement aux tables est $p_I = T (\cos \alpha + \cos \beta)$ et la force exercée aux points de fixation des cordes C et B est $f_I = F (\cos \gamma + \cos \delta)$, soit $F (\sin \alpha + \sin \beta)$.

Ce schéma est réalisé rigoureusement (au mm près) dans tous les instruments de maîtres, comme nous nous en sommes assurés par une cinquantaine de relevés systématiques.

Les bons luthiers réalisent encore actuellement, en suivant la tradition, ce dispositif; ceux qui ont essayé de s'en écarter sont toujours revenus à la tradition. En effet, diminuons la hauteur des éclisses et considérons le système CEK; la force f_3 augmente: la traction sur le fond étant plus grande, celui-ci se déforme plus vite. Par ailleurs, pour un déplacement de A on a un déplacement plus faible du point D: le système AHD étant un système matériel, les luthiers ont remarqué que l'émission du son était moins bonne. Pour ces raisons ils s'en tiennent à certaines règles de construction pratique qui réalisent le système schématique. Ces règles se résument ainsi:

- alignement du sillet C dans le plan de la table;
- hauteur du chevalet + hauteur de voûte de la table = hauteur des éclisses + hauteur de voûte du fond.

Ainsi s'explique l'anomalie apparente du violoncelle. Les éclisses de celui-ci sont proportionnellement beaucoup plus hautes par rapport à la longueur de l'instrument; pour réaliser le schéma ci-dessus il faut donc un chevalet de hauteur proportionnelle à celle des éclisses: si les voûtes de la table et du fond sont égales, il faut que la hauteur du chevalet soit égale à celle des éclisses, ce que l'on vérifie dans tous les instruments classiques.

On se trouve en définitive devant un système complexe de forces et de réactions que l'on peut simplifier de la façon suivante: d'une part, la pression du chevalet sur la table tend à enfoncer celle-ci; d'autre part, les réactions f_8 et f_9 s'opposent à la précédente. La force f_8 est déterminée par le flambement de la table (donc fonction de l'angle des cordes en A, et de la flèche de la table HI); la force f_9 est déterminée par la hauteur des éclisses et de la flèche du fond.

Dans le violon classique, la flèche des voûtes est de 15 mm environ, la hauteur des éclisses 30 mm, le chevalet 30 mm, ce qui réalise les conditions d'équilibre optima. On peut calculer les valeurs des diverses forces du système théorique, mais le calcul ne vaut que pour la section médiane longitudinale de l'instrument; la réalité est infiniment plus complexe. Mais en tout état de cause, on peut admettre, en considération de la tenue remarquable de l'instrument classique sous des tensions voisines de 25 kg, que les normes établies graduellement par

l'empirisme se rapprochent au mieux des conditions théoriques.

4°) LA SÉLECTION DES MATERIAUX : La réaction des matériaux à la déformation est fonction de la forme, comme on vient de voir; elle l'est aussi des caractéristiques des matériaux, en particulier de leurs modules élastiques. Les praticiens ont été conduits graduellement à éliminer les essences de bois les moins appropriés. Les bois constamment utilisés sont l'épicéa et l'érable.

L'épicéa présente, sous une faible densité (entre 0,45 et 0,55), un module d'élasticité élevé (12 à 15000) et une résistance considérable à la déformation. Son élasticité de flexion est beaucoup plus grande dans le sens perpendiculaire aux fibres que dans le sens des fibres (ce dont on verra l'intérêt plus loin). Ce bois semble réaliser au mieux les conditions requises, quand il est sélectionné de façon convenable.

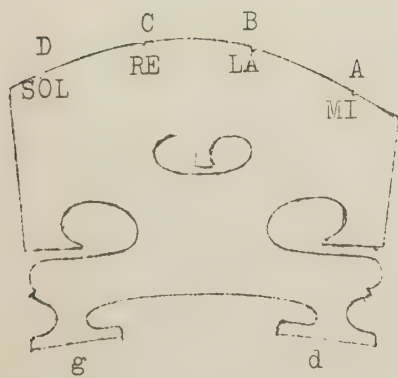
L'érable est connu depuis des siècles pour sa résistance à la déformation et ses qualités élastiques. On l'utilisait couramment comme ressort avant l'extension des ressorts d'acier; il n'y a pas si longtemps, les anciens tourneurs à pointes se servaient encore de perches en érable pour remonter leur pédale parce qu'on savait que ce ressort ne se "rendait" jamais (TOLBECQUE).

En fait, il est bien connu que les propriétés d'un même bois varient de façon considérable selon la partie du tronc où l'on prélève l'échantillon (Kuenzi), selon le terrain où a grandi l'arbre (nature, altitude, exposition au soleil, etc). Nous avons fait des mesures systématiques sur la déformation permanente sous contrainte de 25 échantillons d'érable de provenance diverse. Des règles de bois de 25 cm de long, 5 mm de section ont été soumises pendant un an à une flexion de l'ordre de 2 cm; un tiers des échantillons environ est resté déformé de façon sensible (5 mm); d'autres échantillons sont entièrement revenus à leur forme primitive. Une sélection rationnelle peut donc être faite, mais une étude systématique serait nécessaire pour déterminer le rôle de certains paramètres (Humidité, forme donnée aux éprouvettes par rapport aux fibres etc).

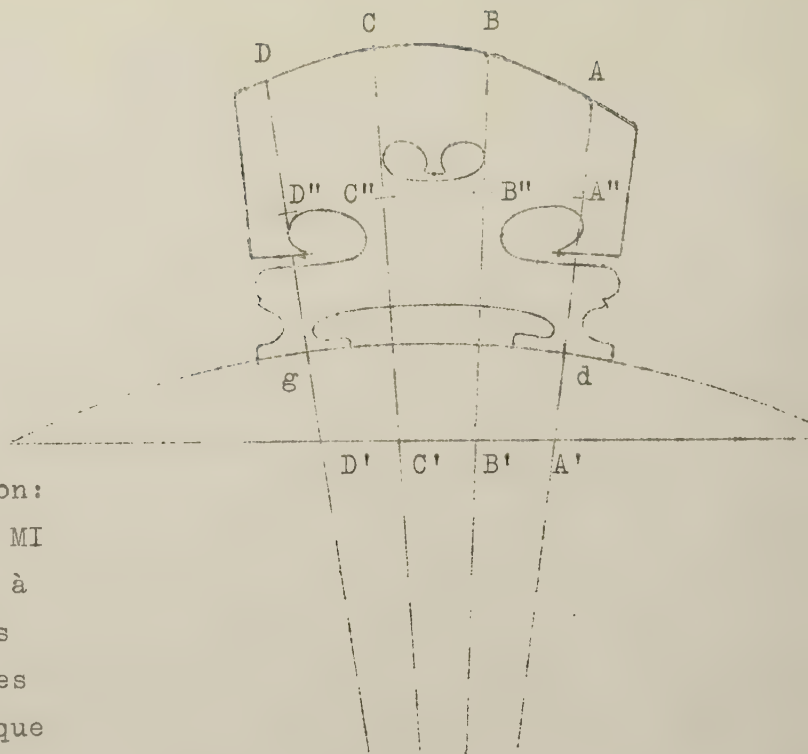
En résumé tout l'instrument est réalisé en vue d'éviter



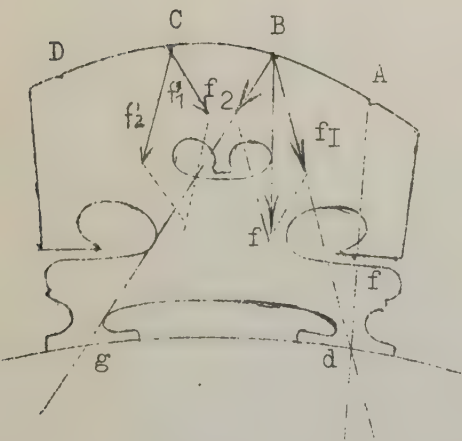
FIG. 6



- a) Chevalet normal de violon:
les tensions des cordes MI et LA étant supérieures à celles de RE et SOL, les luthiers maintiennent les points A et B plus bas que C et D ($Ad < Dg$).



- b) Projection orthogonale des points de fixation A'' B'' C'' D'' des cordes au cordier et A' B' C' D' au sillet de la touche sur le plan du chevalet. Les plans déterminés par les cordes sont normaux à la table.



- c) La corde MI ne met à contribution que le pied droit du chevalet (Ad étant normal à la table). La corde LA met à contribution les deux points d'application g et d ($f_I > f_2$).
D (SOL) : pt d'applic. g ; pour C : $f'_I < f'_2$.



la déformation.

c) Mécanisme de l'amplification : Une des particularités acoustiques du violon est d'amplifier, à niveau à peu près constant, une étendue de 4 octaves $1/2$. De ce point de vue, le violon réalise un dispositif remarquable, eu égard à la simplicité des moyens employés. Trois particularités contribuent à l'efficacité du système: le chevalet, le système âme-barre et les propriétés de l'épicéa.

1^a) LE CHEVALET : Après de nombreuses variations de forme, le chevalet du violon s'est stabilisé dans sa forme traditionnelle il y a déjà 300 ans (Fig. 6 a). La corde MI est posée sur l'extrémité droite, la corde SOL à gauche; les cordes LA et RE occupent des positions intermédiaires.

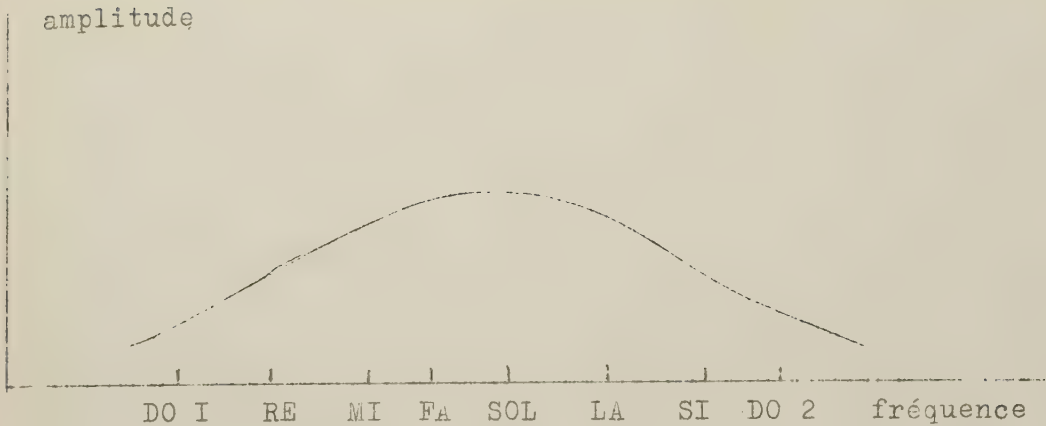
Chaque corde fait un angle au chevalet et détermine donc un plan. Etant donné la forme courbe du haut du chevalet, les 4 plans ne sont pas parallèles, mais convergents, et normaux à la surface de la table. Représentons la coupe de la table dans le plan du chevalet (Fig. 6 b) et faisons sur ce plan une projection orthogonale des points de fixation des 4 cordes au cordier (A" B" C" D") et des quatre points du sillet du manche (A' B' C' D') où passent les cordes. On voit que les plans des cordes convergent en un point O. On vérifie que les écarts au sillet sont de l'ordre de 6 mm; sur le chevalet les écarts sont d'environ 11 mm et au cordier ils sont de 9 mm. Les deux plans des cordes extrêmes passent respectivement par le pied droit et le pied gauche du chevalet et sont normaux à la table. Si on admet que la composante verticale de la vibration de la corde se trouve dans le plan de la corde, on fait les remarques suivantes :

a) La force périodique de la corde MI est intégralement transmise à la table par le pied droit g (le pied gauche n'est pas mis à contribution);

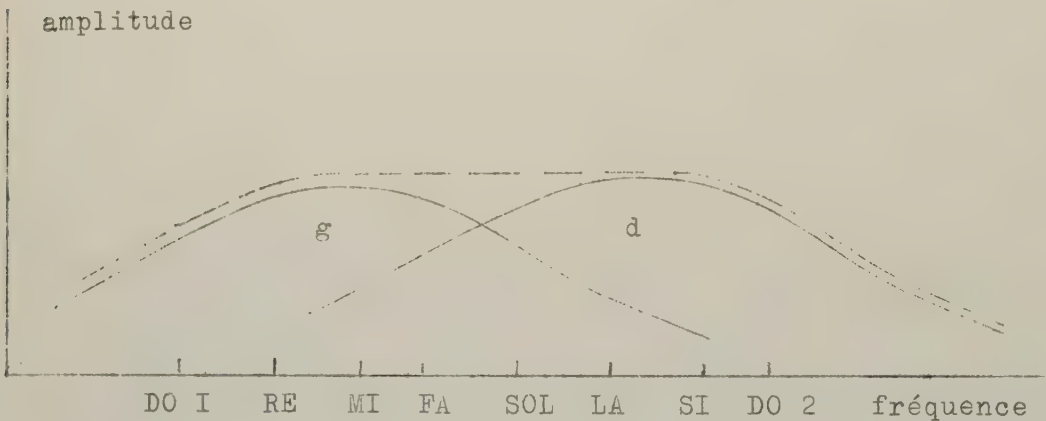
b) la force périodique de la corde SOL est intégralement transmise à la table par le pied droit d;

c) la force périodique de la corde LA est répartie entre les deux points d'application matériels (d et g) et décomposée ainsi en deux vecteurs dont celui qui s'appuie sur le pied droit est le plus

FIG. 7



Si la fréquence propre de la table aux deux pieds est identique (FA dièze par exemple), les diverses notes sont amplifiées inégalement.



Si les deux pieds ont des fréquences propres différentes (par exemple à la quinte l'une de l'autre), la courbe de résonance résultante est aplatie entre RE et LA; les notes extrêmes (DO I ; SI I ; DO 2) ont une amplitude supérieure au cas précédent. L'art du luthier consiste à régler l'écartement des divers sommets de résonance en fonction de l'aplatissement des deux courbes (c'est à dire du coefficient d'amortissement des matériaux employés) afin d'obtenir une amplification homogène des diverses notes de la gamme.

important;

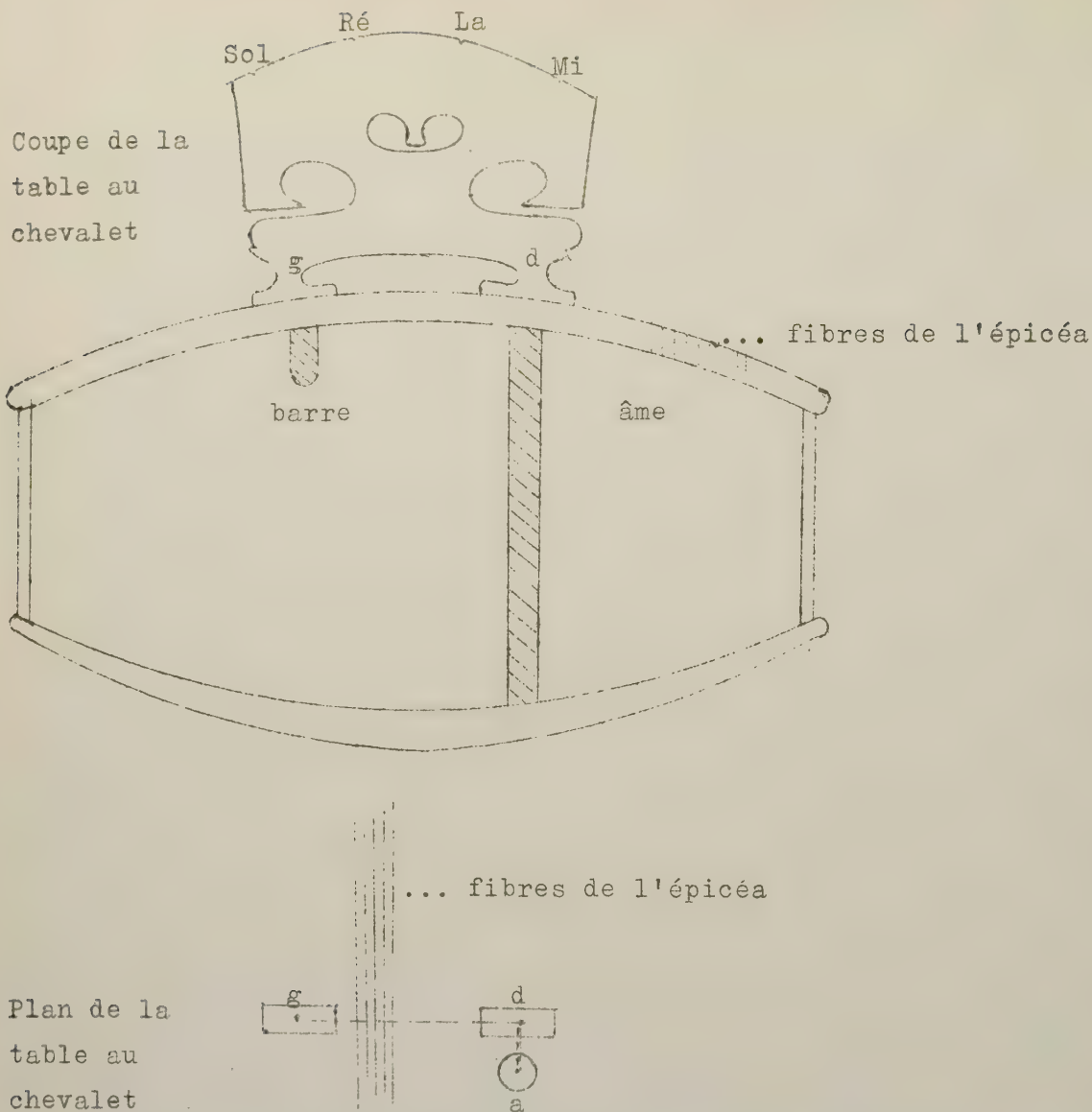
d) même observation pour la corde RE, mais le plus grand vecteur est appliqué au pied gauche.

En d'autres termes chaque corde agit différemment sur les deux pieds du chevalet.

Supposons que l'on pose ce chevalet sur un résonateur ayant une fréquence propre déterminée, ce résonateur étant défini par sa courbe de résonance plus ou moins aplatie selon l'amortissement du système (Fig. 7 a). On peut prendre une membrane circulaire en peau; le chevalet est posé au milieu de la membrane: les deux pieds sont alors appliqués sur des points de la membrane ayant des propriétés élastiques identiques. Si on pose sur le chevalet 4 cordes normales de violon (MI, LA, RE, SOL) et si on joue les diverses notes que peut donner l'instrument, le niveau de ces notes sera d'autant plus élevé que leur fréquence se rapprochera davantage de la pointe de résonance de la membrane ou du résonateur; les niveaux relatifs entre les diverses notes ne seront pas homogènes, et cela d'autant moins que la courbe du résonateur sera moins aplatie (faible coefficient d'amortissement). Ainsi ce dispositif ne permet que l'amplification d'une gamme relativement étroite de fréquences. Pour obvier à cet inconvénient, le violon présente un dispositif particulier: le système âme-barre.

2a) LE SYSTEME AME-BARRE (Fig. 8) : La caisse de violon est de structure interne dissymétrique: comme on l'a vu précédemment, le pied droit du chevalet est placé à quelques mm de l'âme; celle-ci s'appuyant à son tour sur le fond d'érable, ce point est relativement rigide. Le pied droit du chevalet est placé en un point de la table dont le degré de liberté est faible. Par contre, sous le pied gauche est collée la barre; celle-ci augmente la masse de la table en ce point, mais le degré de liberté est ici considérablement plus grand. Ainsi le dispositif âme-barre réalise un système à double degré de liberté. Etant donné ce qui a été précisé plus haut au sujet de la répartition des forces sur les deux pieds du chevalet, on voit qu'en passant de la corde aiguë MI à la corde SOL, le degré de liberté augmente graduellement. En d'autres termes on dispose avec ce système d'un résonateur à caractéristique variable avec la fréquence de l'excitation. Ce dispositif anticipe

FIG. 8



Le degré de liberté du point d (côté des aigus) est faible car:

- l'âme s'appuie sur le fond
- la distance da est petite (5 mm)
- les fibres du sapin sont dans le sens da.

Le degré de liberté du point g est important car:

- la distance gd est grande (30 mm)
- la flexion se fait dans le sens transversal aux fibres.

L'intervalle entre les sommets des deux courbes de résonance (rapport entre fréquences propres des points d et g) est donc fonction des propriétés des bois, des épaisseurs et du rapport dg/da .

une technique classique des circuits oscillants; par exemple les circuits moyenne fréquence à large bande passante des récepteurs radio-phoniques: pour aplatir une bande passante dans une gamme assez large, on couple deux circuits oscillants convenablement amortis et de fréquence nominale légèrement différente: on obtient ainsi par un réglage approprié la courbe désirée.

Nous avons fait un relevé des fréquences propres de l'instrument sous le pied gauche et le pied droit pour une quarantaine d'instruments. On a utilisé la méthode simple et expéditive d'excitation à l'aide d'une petite tige de verre frottée à l'aide du doigt préalablement trempé dans de l'eau acidulée. Les résultats varient d'un instrument à l'autre selon le réglage des paramètres (structure et matériaux). L'intervalle entre la fréquence propre du pied droit et celle du pied gauche se situe entre la quarte et l'octave environ.

Prenons un cas particulier pour fixer les idées (Violon C.98): on a fait successivement les mesures aux deux pieds avec et sans âme; on trouve :

Sans âme :	pied gauche	390 Hz (SOL 3)
	pied droit	385 Hz (SOL b 3)
Avec âme :	pied gauche	476 Hz (SI b 3)
	pied droit	790 Hz (SOL 4).

Ainsi, sans âme, pied gauche et pied droit ont à peu près la même fréquence; avec âme l'intervalle est d'une sixte environ et la fréquence moyenne est notablement plus élevée avec l'âme.

Les bois ayant un coefficient d'amortissement assez élevé, on sait qu'on aura ainsi des courbes de résonance assez aplaties; dans l'instrument précédent, le dispositif âme-barre déterminera donc un système de résonateur double qu'on peut représenter par deux courbes de résonances de fréquence de pointe respectivement égales à 476 et 790 Hz. La somme de ces deux courbes donne une courbe aplatie pour une gamme assez large (Fig. 7 b): la corde MI (660 Hz) mettra à contribution la courbe d, la corde SOL (220 Hz) mettra à contribution la courbe g; les cordes intermédiaires procéderont de la partie plate de la courbe résultante; ainsi obtient-on une amplification de niveau sensiblement constante pour toutes les notes de l'instrument.

Une part importante de l'art du luthier (pour ce qui concerne l'homogénéité de niveau entre les notes) consiste à établir, selon l'amortissement des bois utilisés, un intervalle de fréquence donné entre les deux pieds du chevalet pour réaliser une courbe de résonance résultante présentant le palier optimum de largeur.

3^a) LES MATERIAUX : Avec un matériau isotropique on n'obtiendrait pas, dans les mêmes conditions, un intervalle de fréquence aussi considérable entre pied droit et pied gauche; l'efficacité du dispositif âme-barre est encore accrue du fait que l'on utilise l'épicéa, matériau spécifiquement anisotrope. En effet, une planchette de ce bois coupée sur maille possède une flexibilité considérablement plus grande dans le sens transversal aux fibres que dans le sens des fibres. Les modules élastiques sont très différents dans ces deux sens: ils sont 5 à 10 fois plus élevés dans le sens des fibres. PASQUALINI donne les vitesses suivantes : 5600 m dans le sens des fibres, 1100 m dans le sens transversal. D'autres auteurs (BECQUEREL) donnent quelques exemples :

Module d'élasticité E :	sens des fibres	sens perpendiculaire
sapin	1113 Kgmm ²	95
hêtre	980	270
chêne	921	189

L'écart des modules est le plus important pour le sapin, ce qui justifie le choix de ce bois pour les tables.

En résumé, la disposition âme-barre conjointement avec la sélection des matériaux du violon permet d'exploiter au mieux les lois de sensibilité de l'oreille, en réalisant un système double d'amplification par résonance: côté âme, amplification des notes aiguës (petites amplitudes); côté barre, amplification des notes graves (grandes amplitudes). Cette disposition est justifiée par les courbes bien connues de FLETCHER et MUNSON.

4^a) APPLICATION AUX AUTRES INSTRUMENTS du quator :

Les courbes de sensibilité expliquent aussi accessoirement pourquoi les dimensions des divers instruments du quator ne sont pas inversement proportionnelles à leur fréquence moyenne et pourquoi ils ne sont pas géométriquement semblables. Pour un instrument accordé à une douzième en

dessous du violon (violoncelle) on serait conduit, pour respecter les rapports des dimensions, à des tailles prohibitives. Les premiers constructeurs de violoncelles ont utilisé un autre artifice pour augmenter les forces des cordes (composante normale à la table): ils ont fermé l'angle des cordes au chevalet: d'où nécessité d'un chevalet plus haut, et, corrélativement, pour les raisons précisées plus haut, d'éclisses plus élevées en proportion. On voit que la structure des divers instruments tient implicitement compte des courbes de sensibilité de l'oreille.

d) Mécanisme de la synthèse du spectre : L'ensemble du phénomène sonore provoqué par une note est défini par la représentation tridimensionnelle du son (MOLES 2 et 3). Le timbre est, pour le physicien, la sensation résultant de la forme du spectre. Ce spectre évolue à chaque instant depuis l'amorçage jusqu'à l'extinction.

1) Transitoires : Dans un court délai appelé transitoire d'attaque, le spectre comporte une très large partie continue de laquelle émerge progressivement un spectre de raies, spectre qui s'appauvrit rapidement à partir de l'instant où la note n'est plus entretenue pour laisser subsister seulement un certain nombre de résonances décroissant d'une façon voisine de l'exponentielle au cours de l'extinction. L'époque où l'archet attaque la corde se différencie suffisamment de l'époque où le régime entretenu est atteint pour justifier le terme de transitoire. Les transitoires sont caractérisés par leur forme et leur durée. Dans les instruments à cordes frottées, la forme est essentiellement fonction du mode d'excitation de la corde: nous y reviendrons dans un prochain paragraphe (cordes). La durée du transitoire doit être faible dans un instrument mélodique tel que le violon (les virtuoses jouent fréquemment 10 à 15 notes seconde; d'autre part, la durée du transitoire doit être inférieure à la constante de temps de l'oreille soit 50 ms). C'est ce qui a conduit les facteurs d'instruments à utiliser des bois de faible densité et de modules élastiques les plus élevés possible; ils ont aussi cherché le point d'excitation le plus favorable des tables. Nous avons remarqué que le chevalet est placé au centre de gravité de la table dans la plupart des instruments classiques; GREILSAMER (18/3) avait fait des observations analogues; ce résultat



FIG. 9

La géométrie du violon est établie à partir d'un "module" : la longueur intérieure de la caisse AB. On a

$$DE = AB/2$$

$$FG = DE \cdot 5/4 = AB \cdot 5/8$$

$$MN = AB/3$$

Le chevalet est en C, symétrique de C' par rapport au milieu de AB; on a $AC'/C'B = CB/CA = 5/4$ et $AC \cdot DE = CB \cdot FG$.

Le tracé des contours est formé d'une série d'arcs de cercle raccordés. On a (centres entre parenthèses) :

$\overline{A'Q}$ (A')

$\overline{QE}$ (O')

$\overline{EV}$ (O)

$\overline{VV'}$ (C'')

$\overline{V'G}$ (O'')

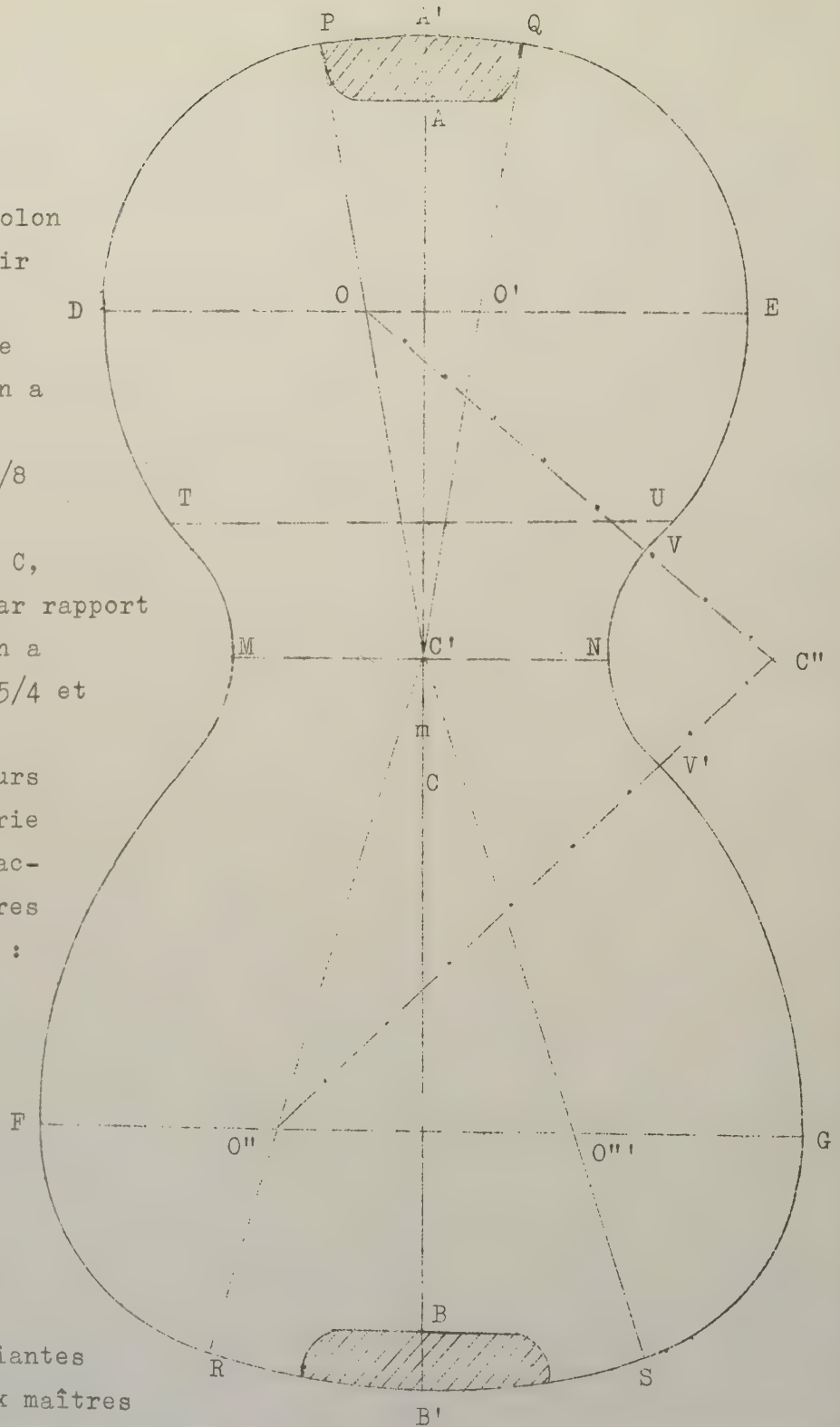
$\overline{GS}$ (O''')

$\overline{SB'}$ (C').

On retrouve cette

forme avec des variantes chez les principaux maîtres

luthiers célèbres; les variations d'aspect de l'instrument proviennent aussi des coins (forme et place): l'aspect esthétique est varié, mais la forme interne de la caisse ne change pas.



n'est certainement pas fortuit. L'examen de la géométrie de l'instrument classique nous a montré que la table obéit à certaines relations simples (résumées fig. 9); à priori, on peut supposer qu'un système mis en vibration possède un transitoire d'autant plus court que l'excitation se rapproche du centre de gravité du système, ce qui justifierait la place traditionnelle du chevalet de violon sur la table; des recherches systématiques restent à faire pour éclaircir ce point.

2) Le spectre en régime permanent : Des analyses faites au sonagraphe montrent que chaque note de violon possède un spectre de régime permanent distinct: celui-ci est la superposition d'une multitude de fréquences propres d'importance variée provenant de chacune des parties constitutives de l'instrument. Chacune des parties constitue un résonateur ayant une fréquence propre avec ses harmoniques; on peut facilement mettre en évidence par simple excitation à l'archet les fréquences propres de la touche, du cordier, de la tête, des chevilles etc.

C'est la multiplicité de ces résonances qui apparaît dans les courbes de réponse qu'on a relevées. Excitons un tel système de résonateurs par une vibration fondamentale et ses harmoniques; certains de ces harmoniques (ceux qui coïncident avec une résonance déterminée) seront amplifiés; il suffit donc que la fréquence d'excitation change légèrement pour que le système de coïncidence entre harmoniques et points de résonance de la réponse se modifie; le spectre change donc avec chaque fréquence d'excitation et on comprend les variations continues de spectre d'un violon lors du jeu de l'instrument.

Les raisonnements précédents sont relatifs à l'excitation par un fondamental et la série de Fourier correspondante; le problème se complique du fait que le violon est excité par des cordes; or le mouvement vibratoire des cordes est complexe. Il est donc indispensable d'étudier les phénomènes qui se produisent lors de l'excitation d'une corde isolée par archet et de voir de quelle manière les vibrations sont transmises à l'instrument. Cette étude fait l'objet du prochain chapitre.

CONCLUSION :

=====

1^a) Nous avons montré que les dimensions du violon sont à l'échelle anatomique et physiologique de l'homme et que la tessiture exploite au mieux les courbes de sensibilité de l'oreille.

2^a) La forme des contours et des voûtes est déterminée par la condition idéale du minimum de déformation avec le minimum de matière (ove, chaînette).

3^a) L'architecture générale de l'instrument assure une répartition des forces garantissant la stabilité de l'instrument dans le temps.

4^a) La sélection des matériaux répond aux mêmes impératifs.

5^a) Le système d'amplification (âme-barre-chevalet) permet d'obtenir un niveau suffisamment constant sur une étendue de 4 octaves I/2.

6^a) Le mécanisme de la synthèse du spectre est extrêmement complexe; le violon étant un ensemble de résonateurs couplés excité par une corde dont le fonctionnement demande une étude séparée, faisant l'objet du chapitre suivant.

A) LES CORDES - ORGANES VIBRANTS

-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

La plupart des auteurs qui ont abordé le problème des instruments à cordes considèrent en général ceux-ci comme des systèmes destinés à amplifier les vibrations transversales des cordes. Les expériences de CHARRON que nous avons sommairement vérifiées montrent que la force transmise par l'archet à la corde affecte avec une approximation suffisante une forme de dents de scie due aux propriétés du frottement des surfaces colophanées. La corde est un premier résonateur qui va actionner à son tour le corps de l'instrument par l'intermédiaire des points de couplage. La forme de vibration prise dans son ensemble est modifiée par les paramètres de l'excitation (point d'attaque de l'archet sur la corde, pression de l'archet, vitesse de défilement etc; ces derniers points ont fait l'objet d'études assez détaillées (CHARRON; BLADIER I, 3, 4, 5). L'étude expérimentale, corroborant l'écoute, et l'enregistrement oscillographique montrent pourtant que ces paramètres sont insuffisants pour expliquer le fonctionnement de la corde harmonique; en particulier ils ne permettent pas d'aboutir à une doctrine relativement au couplage de la corde et de l'instrument ou à la fabrication des cordes harmoniques.

Un certain nombre de points restent d'ailleurs à préciser dans l'action de l'archet sur une corde, car les conditions théoriques ne sont jamais effectivement remplies. Par exemple, il n'existe, dans une corde excitée à l'archet aucun noeud véritable de vitesse, mais uniquement des noeuds relatifs. D'autre part, des expériences systématiques faites au sonagraphe avec des pressions d'archet variables ont montré que la notion même de noeud et de ventre relatifs est évanescence et fonction de la pression de l'archet et de la tension de la corde.

Exemple: On a vérifié qu'une corde SOL de violon excitée à l'archet au $1/7$ de sa longueur présente un spectre où l'harmonique 7 est inexistant, conformément à la théorie; mais si la pression de l'archet augmente de façon notable, l'harmonique 7 apparaît avec un

niveau élevé; le point de contact corde-archet qui était un ventre relatif pour une faible pression est devenu un noeud relatif pour une pression élevée. Les pressions correspondaient respectivement au pianissimo et au forte: conditions normales du jeu de la corde. Il est du reste indispensable d'étudier la corde isolée indépendamment du point d'attaque.

I) MODES DE VIBRATION D'UNE CORDE ISOLEE ATTAQUEE PAR UN ARCHET :

a) Vibrations transversales : Si on tend une corde entre deux points fixes, elle ne peut entrer en vibration transversale que si elle est extensible; l'amplitude de la vibration à force d'excitation égale est inversement proportionnelle au module d'élasticité. Comme il faut des amplitudes notables dans les instruments à cordes, on a sélectionné de tout temps pour les cordes des matériaux à faible module d'élasticité (exemple: le boyau). Si on avait recours à des cordes pratiquement inextensibles (pour les tensions d'utilisation envisagées), on ne pourrait obtenir une amplitude transversale notable que si les points de fixation présentent un degré de liberté suffisant. Mais dans ce cas la vibration du support étant très complexe, la vibration transversale le devient également comme nous verrons par la suite.

b) Vibrations longitudinales : Puisque la corde isolée s'allonge pour vibrer transversalement, on produit nécessairement des vibrations longitudinales; l'amplitude de celle-ci est aussi inversement proportionnelle au module d'élasticité de la corde. Ces vibrations déterminent des variations périodiques de force transmises aux points de fixation. Il est facile de mettre en évidence les vibrations longitudinales d'une corde; il suffit de la frotter dans le sens de la longueur avec un archet ou une peau de chamois colophanée. Nous l'avons aussi enregistrée à l'oscillographe et au sonagraphe. Dans toute corde vibrante vibrations transversales et longitudinales coexistent obligatoirement (-expérience-).

c) Vibrations de torsion : L'excitation transversale d'une corde par un archet, le gras du doigt, un plectre en peau etc. provoque obligatoirement des vibrations de torsion car aucune corde n'est absolument rigide. On met facilement en évidence cette vibration en collant

sur la corde une petite aiguille de papier (près du point d'excitation, par exemple où le phénomène est le plus sensible); on pose l'archet sur la corde et on augmente graduellement sa vitesse de défilement. Sous l'effet de la force tangentielle déterminée par le frottement de la mèche colophanée, l'aiguille tourne d'un angle déterminé, jusqu'au point où le couple de torsion de la corde dépasse le pouvoir adhérent de la colophane. La corde revient alors vers sa position initiale avec une vitesse continuellement décroissante jusqu'au point où le coefficient de frottement de la colophane dépasse le couple de torsion; la corde amorce alors une nouvelle période de torsion etc. On obtient une oscillation de relaxation torsionnelle (c'est le même phénomène que Charron a étudié pour les vibrations transversales, au langage près).

On vérifie expérimentalement que l'angle de rotation auquel se produit le décrochement (et qui détermine l'amplitude de la vibration torsionnelle) est fonction de plusieurs paramètres: qualité de la colophane, rigidité de la surface excitatrice, pression de la mèche sur la corde, vitesse de défilement, paramètres élastiques de la corde (rigidité en particulier) etc. Si les conditions d'excitation sont normalisées, la simple mesure de l'angle de torsion permet de différencier des cordes de nature différente. Pour des cordes métalliques l'angle est très faible; certaines cordes complexes (cordes filées dont l'âme est constituée par des mèches de fils) peuvent faire plusieurs tours sur elle même avant décrochement.

Il est donc impossible d'exciter transversalement une corde avec un archet sans l'exciter aussi torsionnellement. Nous avons réussi à mettre en évidence la note torsionnelle; il suffit d'exercer sur la corde une pression d'archet suffisante pour atténuer l'amplitude des vibrations transversales; moyennant une vitesse de défilement bien choisie, la note torsionnelle émerge sous forme d'une note musicale nette, toujours plus grave que le fondamental transversal pour les cordes traditionnelles (- démonstration -).

d) Vibrations d'octave (fréquence double du fondamental transversal) : Nous avons utilisé un archet circulaire en buis (roue de vielle); on observe que la corde ne quitte jamais la surface de la roue; comme le diamètre de celle-ci est assez grand (diamètre 30 cm) et l'amplitude

de la vibration faible (4-5 mm), la corde vibre pratiquement dans un plan. Dans ces conditions, les points de fixation de la corde sont soumis à des tractions périodiques de fréquence double de celle du fondamental transversal (on a un maximum de traction chaque fois que la corde est aux positions extrêmes du fuseau). Il se produit donc une vibration longitudinale de la corde ayant une fréquence double et synchrone de la fréquence transversale que nous appelons vibration d'octave. Ce phénomène, signalé par RAMAN, est d'une importance considérable dans le problème des instruments de musique. Une centaine d'enregistrements au sonographe ont en effet mis en évidence la prédominance de l'harmonique 2 dans les instruments à archet (LEIPP 4). L'amplitude de l'harmonique 2 est souvent égale ou supérieure à celle du fondamental (72 % des 154 cas examinés); nous avons fait le rapprochement entre cette observation et la vibration d'octave et abouti aux conclusions suivantes :

Quand on utilise un archet à surface de frottement rigide (roue de vielle ou règle colophanée), la corde vibre dans un plan; si on utilise un archet normal (mèche de crin tendue sur baguette), on constate que le fuseau n'est plus un plan, mais un volume dont la section est de forme plus ou moins ovoïde. L'aplatissement de cet ovoïde est fonction d'une part de la tension et du module d'élasticité de la corde, d'autre part de la tension et du module d'élasticité de la mèche. Pour une corde et une mèche données, la forme de la section est donc fonction des tensions relatives entre la mèche et la corde. Si le fuseau est plat, l'effet de la vibration d'octave aux points de fixation de la corde est maximum; si la section était circulaire, l'effet serait nul. Or la vibration d'octave est amplifiée, comme on a vu, par flambement de la table, d'où les variations de l'harmonique 2 signalées plus haut. La mèche d'un archet normal est tendue entre 3 à 7 kg; la tension des cordes de violon varie de 3,5 à 7 kg; par un réglage approprié de la tension de la mèche, on peut donc donner à la forme du fuseau une section déterminée, c'est à dire varier le niveau relatif de l'harmonique 2; la variation de timbre obtenue par modification de tension de la mèche est bien connue subjectivement des instrumentistes.

Puisque nous avons vu au paragraphe précédent que les vibrations transversales sont inséparables des vibrations longitudinales et

des vibrations de torsion, on peut dire que dans toute corde excitée par un archet coexistent 4 types de vibrations simultanés: vibrations transversales, longitudinales, torsionnelles et vibrations d'octave.

2^a) MODE DE TRANSMISSION ET D'AMPLIFICATION DES MOUVEMENTS VIBRATOIRES DE LA CORDE MONTÉE SUR INSTRUMENT :

Quelle est l'influence de la variété de ces modes de vibration sur l'instrument ?

a) Vibrations transversales : Le chevalet, mobile par définition, communique à la table la fréquence fondamentale transversale de la corde par l'intermédiaire du chevalet, selon le processus étudié plus haut. Cette vibration transversale ne représente qu'une partie de l'énergie fournie par l'archet; le pourcentage est inversement proportionnel à l'angle des cordes sur le chevalet; si l'angle est de 180° , l'énergie des vibrations transversales s'annule, le fondamental disparaît, le timbre est plus clair. Pour obtenir ce résultat, il suffit de baisser le chevalet d'un instrument: les luthiers connaissent bien empiriquement ce phénomène, et nous avons vérifié que c'est la compression du niveau du fondamental qui en est cause.

b) Vibrations longitudinales : Comme on a vu précédemment, celles-ci agissent comme des variations périodiques de traction aux points d'attache des cordes. Ces vibrations sont transformées par les tables voûtées en vibrations de flambement; leur fréquence est toujours beaucoup plus élevée que la fréquence transversale (plusieurs octaves); leur énergie et leur amplitude sont fonction du module d'élasticité de la corde excitée et de l'angle des cordes sur le chevalet. Si leur fréquence sort de l'aire d'audibilité, c'est une perte d'énergie acoustique; le niveau (en phones) de l'instrument sera plus faible. Ainsi se justifie l'utilisation des matériaux traditionnels des cordes (boyau, par exemple): ceux-ci transforment au mieux l'énergie mécanique fournie par l'archet en énergie acoustique (le pourcentage d'énergie imparti aux vibrations longitudinales par la structure de l'instrument est concentré au mieux dans la zone sensible de l'oreille).

c) Vibrations d'octave : Elles sont amplifiées par le même processus que les vibrations longitudinales et relèvent donc des mêmes

paramètres structuraux de l'instrument; leurs fluctuations en fonction de l'archet ont été précisées plus haut.

d) Vibrations de torsion : Comme il a été précisé ailleurs, leur fréquence joue un rôle dans la durée des transitoires; elles déterminent des composantes périodiques transmises à la table par le chevalet de la même manière que la vibration fondamentale de la corde.

En résumé : Aucune des différentes manières de vibrer de la corde n'est négligeable dans la transmission des vibrations au corps de l'instrument. Les valeurs relatives des composantes de la vibration globale perçue dépendent du luthier (structure de l'instrument, mobilité des points de fixation etc) et du jeu de l'instrumentiste (tension de la mèche de l'archet et pression de la mèche sur les cordes).

Un instrument de musique est d'autant plus parfait qu'il permet de couvrir une plus grande étendue de la gamme acoustique. Nous avons précisé que pour cette raison, la structure de l'instrument devait être dissymétrique. Pour la même raison, des cordes accordées à des fréquences différentes ne peuvent avoir des caractéristiques physiques identiques: on ne peut faire un violon monocorde à cause des propriétés de l'oreille. Les cordes harmoniques ont suivi, comme les instruments, une évolution de nature empirique et ont abouti à des types bien déterminés pour chaque cas particulier. Le praticien, à l'intérieur de ces types recherche chaque fois une corde présentant des caractéristiques sonores bien définies, mais qu'il n'est capable d'apprécier que de façon subjective. L'expérience montre cependant que ces jugements subjectifs ont un caractère universel; un grand nombre de musiciens choisissent les mêmes cordes pour un même instrument; le physicien doit donc rendre compte de façon objective de ce choix.

En bref, cette étude expérimentale a montré que :

I^a) Une corde isolée attaquée par un archet vibre de quatre façons différentes dont aucune n'est négligeable :

- a) transversalement
- b) longitudinalement
- c) torsionnellement
- d) par dédoublement de fréquence (octave).

Les trois premiers modes coexistent obligatoirement; le 4^e est fonction de la forme du fuseau de la corde.

2^a) L'énergie déterminée par le frottement de l'archet est répartie entre les divers modes de vibration selon la structure de l'instrument (angle des cordes au chevalet et conditions aux points de fixation des cordes en particulier) et selon les paramètres physiques des matériaux employés (modules d'élasticité).

3^a) Pour chaque type d'instrument on recherche des cordes appropriées: le jugement subjectif des instrumentistes doit être physiquement justifié; il convient donc d'étudier les modes de vibration définis du point de vue théorique pour dégager les paramètres sensibles des cordes.

B) ETUDE THEORIQUE DES VIBRATIONS

—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—

I^a) RAPPEL DES FORMULES DE BASE :

Toutes les équations relatives aux mouvements vibratoires des cordes ne sont valables que pour des amplitudes infiniment petites et des cordes théoriques. Les formules permettent cependant de déterminer le sens des variations des phénomènes en fonction des paramètres physiques intéressants; elles sont donc suffisantes pour les résultats qualitatifs recherchés; quand des résultats quantitatifs sont désirables, nous préférons toujours les mesures et l'enregistrement des données expérimentales. Nous utiliserons les équations de fonctionnement sous la forme qui met en évidence les paramètres et les quantités qui ont une valeur pratique dans le phénomène.

a) Vibration transversale : La formule élémentaire des cordes vibrantes, dite de Taylor définit la fréquence transversale N en fonction de la tension T, de la longueur L et de la masse linéique. On a :

$$(1) \quad N = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

En posant s = section droite, μ = densité et t_I = tension par unité de surface de la section transversale de la corde, la formule devient :

$$(2) \quad N = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{t_I}{\mu}}$$

Les cordes matérielles étant rigides, il faut introduire une correction déterminée par la relation

$$(3) \quad N' = N \left(1 + \frac{E \cdot I}{T} \frac{q^2 \pi^2}{2 L^2} \right)$$

dans laquelle N' est la fréquence corrigée, N la fréquence donnée par (2); L : la longueur; q : le partiel considéré; T : la tension; E : module d'élasticité; I : moment d'inertie de la section droite passant par le centre d'inertie de la section et normale au plan de vibration.

Pour les instruments à touche lisse (type violon), on n'a théoriquement pas à s'occuper de la correction due à la rigidité, l'instrumentiste rectifiant instinctivement la position des doigts pour obtenir la fréquence qui lui convient. Cependant les écarts de rigidité entre deux cordes voisines peuvent devenir importants dans certains cas particuliers; si deux cordes voisines sont alors accordées à la quinte par exemple, quand elles sonnent à vide, elles ne sont plus à la quinte quand on les raccourcit d'une même quantité; les instrumentistes disent alors que les "quintes sont fausses": elles ne se trouvent plus en face sur la touche. On a vérifié que l'écart peut être considérable dans le violoncelle (1 cm), ce qui gêne considérablement l'instrumentiste. Si la rigidité des cordes décroît de façon régulière en montant de la corde UT à la corde LA, les quintes entre les 4 cordes sont placées sur une ligne oblique par rapport à l'axe de la touche et le violoncelliste s'habitue, par l'entraînement, à cette disposition; mais si la rigidité des 4 cordes ne suit pas un ordre régulier, il devient impossible de jouer juste ^(I). On voit l'intérêt d'utiliser des cordes de faible module d'élasticité, de faible moment d'inertie, de tension élevée et de grande longueur; ceci

(^I) NOTA : Les instrumentistes habiles remédient à cet état de choses en retournant certaines cordes quand ils ont remarqué que les quintes n'étaient pas justes; ils fixent au cordier l'extrémité de la corde normalement destinée à la cheville et corrigent ainsi le défaut parce que la plupart des cordes sont légèrement coniques.

fournit une justification supplémentaire à l'utilisation des cordes de boyau comparativement aux cordes d'acier.

Pour les instruments à barrettes (type guitare) où les "tons" sont délimités par des barrettes en cuivre, on a été conduit quelquefois à incliner celles-ci de façon à laisser sur le haut des cordes des intervalles plus grands pour les cordes les plus rigides. Cette correction n'est évidemment valable que pour un type déterminé de cordes.

b) Vibration longitudinale: Sa fréquence est déterminée par la relation :

$$(4) \quad N_L = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\mu}}$$

L = longueur; E = module d'élasticité; μ = masse spécifique.

Il est évident que si la formule de Taylor (2) était suffisante pour définir les qualités musicales d'une corde, on pourrait monter sur un instrument des cordes quelconques à condition de satisfaire aux conditions de tension requise par la caisse de l'instrument et aux conditions d'amortissement exigées par la technique de jeu de l'instrument considéré. C'est parce que la vibration longitudinale est transmise à l'instrument, amplifiée par lui et perçue par l'oreille que l'on peut différencier immédiatement une corde en acier d'une corde en boyau montée sur violon, et d'une façon générale toutes les cordes en fonction de leur module d'élasticité et de leur masse spécifique (conformément à (4)).

Pour le vérifier on a procédé à un examen statistique portant sur environ 500 cordes. On a sélectionné des cordes de nature différente et de calibre tel que pour une longueur donnée (50 cm) et une tension identique (2600 g) ; elles avaient la même fréquence (260 Hz); en d'autres termes, ces cordes avaient une masse linéique identique. On les a montées sur un sonomètre; l'excitation transversale est produite par un archet normal de violon. Elles se sont groupées par ordre de timbre en 4 séries distinctes, selon la nature des matériaux utilisés. Dans l'ordre, on a trouvé: acier, laiton, nylon et boyau. Pour connaître les raisons physiques de ce classement, on a mesuré les paramètres physiques suivants: diamètres, masses spécifiques et modules

d'élasticité respectifs. Or l'ordre de classement ne coïncide ni avec l'un ni avec l'autre de ces paramètres. Ceci nous a conduit à mesurer les fréquences longitudinales propres des cordes en question, et nous avons constaté que le classement correspond rigoureusement avec l'ordre des fréquences longitudinales. Le tableau ci-après présente pour chaque espèce un cas type :

type	diam.	fréq. transv.	E	masse sp.	fréq. longit.
acier	25/100	260 Hz	20 000	7,8	5300 Hz
laiton	23/100	"	10 300	8,4	3470 Hz
nylon	65/100	"	530	1,15	2350 Hz
boyau	55/100	"	720	1,60	2100 Hz

Le timbre caractéristique d'une corde est donc fonction du rapport E/μ et non des paramètres E ou μ séparément. Le timbre est jugé d'autant plus acide que E est plus grand et μ plus petit; il dépend de la fréquence longitudinale dont le rôle est d'autant plus notable qu'elle se rapproche davantage de la zone sensible de l'oreille; d'où l'intérêt d'utiliser des matériaux tels que le boyau ou le nylon quand la longueur des cordes est voisine de 50 cm. La fréquence longitudinale est inversement proportionnelle à la longueur; si on utilise de l'acier, à accord transversal identique, mais avec une longueur vibrante plus élevée, la fréquence longitudinale baisse: le timbre devient moins acide. Pour des longueurs inférieures à l'exemple précédent, la fréquence longitudinale sort graduellement de l'aire d'audibilité (exemple: sur 32,5 cm de longueur -cas du violon- la fréquence longitudinale de l'acier atteint 8000 Hz).

c) Vibration de torsion : La fréquence de torsion est de la forme

$$(5) \quad N_r = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{G}{\mu}}$$

μ = densité, G = module de rigidité, L = longueur.

Tout comme pour les vibrations longitudinales, la fréquence de torsion n'est donc fonction que du rapport: module de rigidité / densité.

Nous avons relevé les fréquences de torsion d'environ

500 cordes de nature et de structure différentes et vérifié que ces fréquences sont toujours plus graves que le fondamental transversal dans les cordes traditionnelles. La fréquence de torsion joue le rôle d'un partiel grave de faible niveau, qui se superpose aux autres mouvements vibratoires de la corde.

Dans un tout autre domaine (GRUTZMACHER I), il est connu des fondeurs de cloches que la qualité d'une cloche est jugée bonne quand le "bourdon" (partiel plus grave que le nominal de la cloche) se trouve coïncider avec un "sous-harmonique" du fondamental (l'intervalle nominal-bourdon est alors un intervalle musical consonant: octave, quinte, quarte etc); nous reviendrons sur ce point plus loin.

La pratique conduit les instrumentistes à sélectionner des cordes de rigidité donnée par rapport à une densité donnée; cette constatation coïncide avec les paramètres de la vibration de torsion. C'est la quasi absence de cette note torsionnelle dans les instruments à cordes pincées qui détermine partiellement le timbre plus clair de ces instruments (guitare, clavecin). Dans les instruments à cordes frottées, la corde se comporte comme l'ensemble de deux pendules de torsion couplés à leur base (point de contact de l'archet). L'amplitude de la vibration de torsion est ici assez importante: elle dépend d'une part des propriétés de la surface colophanée (pouvoir adhérent de la colophane, pression de l'archet, vitesse de défilement etc), et d'autre part du couple de torsion qui est de la forme :

$$C = \frac{G \cdot \phi \cdot \pi r^4}{2L}$$

G = module de rigidité, ϕ = angle de torsion, r = rayon de la corde et L sa longueur.

La vibration de torsion est un phénomène complexe; dans certaines conditions il semble se produire des phénomènes d'accommodation entre la vibration transversale et la vibration torsionnelle; si l'étude théorique reste à faire, il est cependant facile de mesurer la fréquence torsionnelle d'une corde donnée, et c'est cette mesure qui est importante ici.

d) Vibration d'octave : Les paramètres sont ceux de la

fréquence transversale puisqu'elle est déterminée à partir de celle-ci (2); on notera que les deux modes vibratoires sont en phase.

2^a) EQUATIONS D'EQUARRISSAGE DES CORDES: NOTION DE "PARAMETRES SENSIBLES" :

Nous avons vu que la corde peut être le siège de 4 types de phénomènes distincts qu'on peut isoler et mettre en évidence.

La corde étant une machine à faire des sons, ses propriétés fonctionnelles sont définies par les amplitudes respectives et la nature des partiels pour chaque note nominale. Nous venons de montrer que ces propriétés sont fonction des matériaux constitutants. Le mouvement transversal détermine la note nominale: c'est le mode principal; mais il convient maintenant d'établir les relations entre ce mode principal et les modes secondaires qui déterminent le caractère du timbre. En d'autres termes, ces relations comportent un aspect énergétique (amplitudes respectives des partiels définis) et un aspect qualitatif (le timbre produit doit satisfaire à un certain nombre de conditions de caractère esthétique).

Quand plusieurs notes coexistent, elles forment un accord, au sens général du terme, et les règles du choix de ces accords sont finalement données à priori par la psycho-acoustique, et le luthier n'a pas à en discuter: il lui suffit de les respecter. En lutherie on peut admettre qu'un accord est d'autant plus consonant que le rapport de fréquences primaires est simple; en fait, la théorie d'HELMHOLTZ, complétée par d'autres travaux (WINCKEL 5) suffit en première approximation aux problèmes de la lutherie.

Nous allons donc examiner successivement les conditions d'accord entre les divers mouvements vibratoires élémentaires d'une corde.

a) Rapport fréquence longitudinale / fréquence transversale: paramètre sensible A :

L'expérience courante des instrumentistes montre que :

- I) Un instrument "sonne" bien quand on lui adapte des cordes de tension déterminée (fonction de l'inertie du système en particulier);



- 2) Mais à tension égale, divers types de cordes ont un rendement acoustique différent; il doit donc exister un paramètre indépendant de la tension.

Expérience : On tend sur sonomètre une corde de boyau: longueur: 50 cm, $\varnothing$ 55/100 de mm, que l'on excite avec un archet normal à 3 cm du sillet. On augmente graduellement la tension de la corde et on relève les fréquences transversales où le son paraît le plus agréable (entre 2 et 8 kg de tension, conditions habituelles d'emploi). On observe qu'il existe plusieurs fréquences transversales pour lesquelles le son possède des qualités particulières. Dans le cas précédent, on a relevé les notes suivantes : FA 3 ; UT 3 ; FA 2 ; Lab 2. On a vérifié que ces notes ne correspondent pas à des fréquences propres du sonomètre.

On a également vérifié que la fréquence longitudinale de la corde était en première approximation indépendante de la tension et correspond à 2100 Hz (UT 6).

En comparant la fréquence longitudinale et les fréquences transversales, on a remarqué que la corde avait un rendement intéressant quand il existait entre elles les accords suivants (intervalles aux octaves près):

UT 3 - UT 6 : octave ; FA 3 - UT 6 : quinte ; FA 2 - UT 6 : quinte ; Lab 2 - UT 6 : tierce.

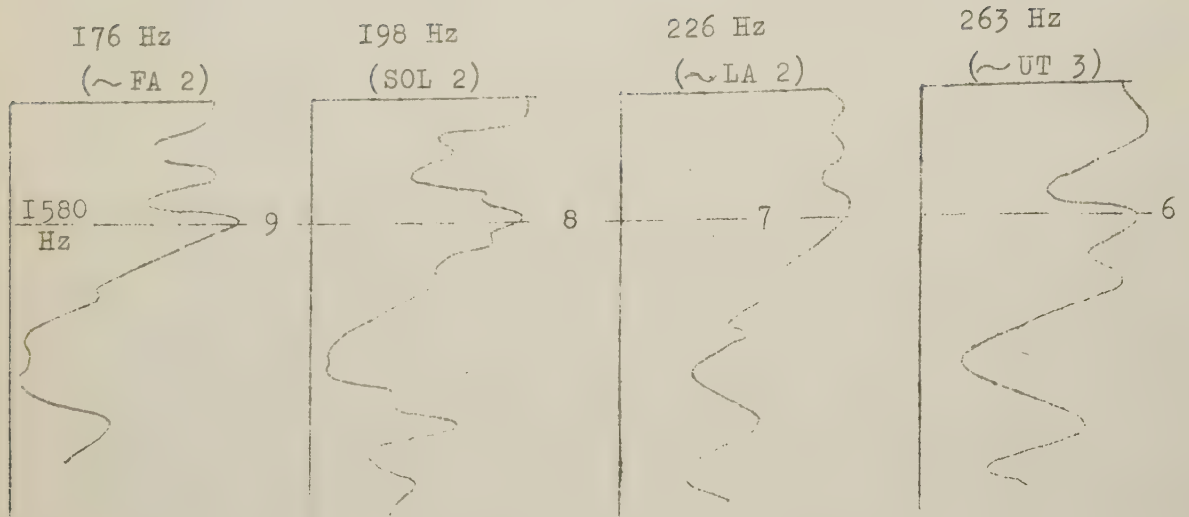
Ce résultat a été corroboré par une expérimentation systématique comportant 24 sujets (violonistes) à qui on demandait de tendre graduellement la corde et de préciser à quelles tensions le rendement acoustique de la corde leur semblait bon; tous, sans exception, ont précisé que le rendement qualitatif (timbre) et le rendement quantitatif (niveau) leur semblait meilleur aux accords précédents et qu'entre ces valeurs les notes étaient "ternes".

Pour définir les fréquences transversales intéressantes, on calcule les intervalles entre la fréquence longitudinale (fixe) et les diverses fréquences transversales relevées. Ces intervalles sont déterminés à partir des équations élémentaires (2) et (4). On a :

$$(6) \quad N_L / N = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\mu}} \parallel \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{t_I}{\mu}} = \sqrt{\frac{E}{t_I}} = \textcircled{A}$$



FIG. 10



On a ici les courbes enveloppes de 4 spectres de raies obtenus en variant la tension d'une corde SOL de violon montée sur un instrument. Les relevés ont été faits aux tensions où le paramètre sensible A est 9, 8, 7, 6. La résonance doit donc se produire successivement sur l'harmonique correspondant: c'est ce que montrent les spectrogrammes.

Le timbre de la corde et de l'instrument change donc quand on tend graduellement la corde.

On note que la fréquence longitudinale ne varie pas avec la tension. .

Le paramètre sensible A apparaît donc dans le spectre instrumental, et ceci d'autant plus que la valeur numérique de ce paramètre est un nombre juste (résonance): les instrumentistes savent empiriquement que l'instrument "sonne" et est "timbré" quand la corde est bien adaptée.

Nous appelons A ce premier paramètre sensible des cordes. Comme on voit il est fonction du rapport entre le module d'élasticité et la tension par unité de surface de la section droite de la corde. A tension par unité de surface égale, le paramètre A variera donc avec E, ce qui justifie la constatation empirique des musiciens.

Ce paramètre sensible explique l'expérience précédente : Quand la fréquence longitudinale coïncide avec un harmonique de la fréquence transversale, celui-ci est amplifié par résonance. Cette résonance peut être facilement mise en évidence à l'oscillographe ou à l'analyseur (sonagraphe: Fig. 10).

Comme il s'agit d'un phénomène de résonance, son amplitude est fonction de la justesse de l'accord transversal-longitudinal conjointement avec l'aplatissement de la courbe de résonance du matériau (fonction de son amortissement); le cachet esthétique de l'accord est fonction de l'intervalle musical réalisé entre les deux fréquences élémentaires.

Dans l'exemple précédent on a :

1) $UT\ 6 / FA\ 3 = 2100/350 = 6$; la fréquence longitudinale coïncide avec celle de l'harmonique 6 du transversal (accord de quinte);

2) $UT\ 6 / UT\ 3 = 2100/262 = 8$; c'est l'harmonique 8 qui est amplifié (accord d'octave);

3) $UT\ 6 / LA\flat\ 2 = 2100/210 = 10$; c'est l'harmonique 10 qui est amplifié (accord de tierce);

4) $UT\ 6 / FA\ 2 = 2100/175 = 12$; c'est l'harmonique 12 qui est amplifié (accord de quinte).

Nous avons relevé le paramètre sensible A sur plus de 600 cordes commerciales et constaté que les cordes dont la qualité de fabrication est satisfaisante ne s'écartent pas des accords musicaux consonants.

La grandeur du nombre mesurant le paramètre A dépend du type d'instrument; en effet, pour certains instruments on désire un amortissement rapide du son (harpe); pour d'autres c'est le contraire

(guitare); la durée d'amortissement d'une corde étant fonction de sa tension, on mettra donc sur une harpe des cordes beaucoup plus tendues par unité de surface que sur une guitare; en d'autres termes, si on diminue t_I dans la relation (6), on augmente le paramètre A et inversement. On sera donc amené à utiliser pour la harpe un paramètre A faible; si on utilise du boyau (E) déterminé, et si on tend la corde au maximum compatible avec la limite de rupture, on constate que le paramètre A qui convient au mieux a pour valeur 6 (quinte), ce que des relevés systématiques ont démontré. Pour des instruments où une tension plus faible est recherchée, une valeur appropriée pour le paramètre A peut être 8 (relation d'octave) ou 10 (tierce) ou 12 (quinte) etc.

Ainsi le timbre caractéristique des divers instruments est-il partiellement fonction du paramètre sensible A des cordes utilisées.

Nous signalons à ce propos que la vibration longitudinale doit être relevée in situ, car les conditions, aux extrémités des cordes montées sur instrument, déterminent une chute de la fréquence longitudinale, proportionnelle au degré de liberté des points de fixation des cordes; nous reviendrons sur cette importante question plus loin.

b) Rapport fréquence transversale / fréquence de torsion:
paramètre B :

Les considérations au sujet de l'intervalle musical restent valables pour la fréquence de torsion.

La différence réside dans le fait que l'intervalle entre fréquence transversale et fréquence longitudinale est toujours très important (de plusieurs octaves, dans les cordes traditionnelles); par contre l'intervalle transversal-torsionnel reste dans la limite d'une octave puisque la note torsionnelle est placée dans les cordes usuelles quelque part dans l'octave inférieure du fondamental.

L'effet musical provenant de l'addition d'un partiel de faible niveau ajouté à un fondamental de fréquence plus élevée que la sienne propre est connu de temps immémorial des fondeurs de cloches qu'il règle empiriquement. Cet effet a été étudié de façon systématique (GRUTZMACHER I et 2, disque); la fréquence inférieure ajoute un caractère de gravité au son entendu dans ces conditions.

On a étudié de quelle manière la durée du transitoire est liée à l'intervalle entre deux sons élémentaires de fréquence voisine (WINCKEL 5) et montré que la durée du transitoire est fonction de la simplicité numérique du rapport des fréquences.

Etablissons l'intervalle entre fréquence transversale et torsionnelle d'une corde en partant des équations élémentaires (2) et (5). On trouve :

$$N / N_r = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{t_I}{\mu}} \bigg/ \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{G}{\mu}} = \sqrt{\frac{t_I}{G}} = \textcircled{B}$$

Le paramètre sensible B dépendant de la vibration de torsion est donc fonction de la tension par unité de surface de la section et du module de rigidité de la corde. L'intervalle est donc défini par la valeur numérique du paramètre B. En considération de ce qui a été dit plus haut, les rapports de fréquence les plus intéressants entre fréquence transversale et fréquence torsionnelle sont dans l'ordre

$2/1 = 2$: octave ; $3/2 = 1,5$: quinte ; $4/3 = 1,33$: quarte ;
 $5/4 = 1,25$: tierce etc.

Dans cet ordre, on aura un transitoire de durée régulièrement croissante et une consonance régulièrement décroissante; en d'autres termes une diminution de la qualité musicale de la corde.

Pour le vérifier, nous avons relevé le paramètre sensible B d'environ 500 cordes harmoniques et vérifié que l'on cherche empiriquement à encadrer les valeurs favorables dans la fabrication des cordes de musique.

Nous avons vérifié expérimentalement le rôle de l'intervalle transversal-torsionnel:

EXPERIENCE : On monte une corde en nylon, $\varnothing$ 72/100 de mm, longueur 50 cm, sur un sonomètre et on excite la corde avec un archet normal. L'expérience est plus nette si on dispose d'un filtre passe bas qui coupe les fréquences supérieures à 1000 Hz. On tend graduellement la corde de façon à faire varier sa fréquence transversale de 200 à 500 Hz. A l'audition on relève trois fréquences où le timbre présente un caractère remarquable. Ce sont : LA 2 (220 Hz) ; RE 3 (295 Hz) et LA 3 (440 Hz); ces fréquences

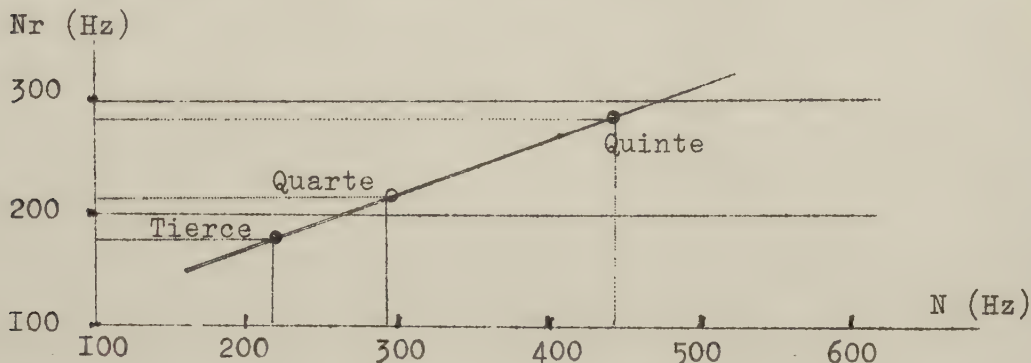


transversales correspondent respectivement aux fréquences de torsion de 176 Hz, 220 Hz et 295 Hz; d'où les valeurs suivantes du paramètre B.

1^a) $220/176 = 1,25$; 2^a) $295/220 = 1,33$; 3^a) $440/295 = 1,5$.

Au fur et à mesure qu'on tend la corde, le timbre devient plus agréable et les pointes de rendement acoustique correspondent aux conditions théoriques définies plus haut.

La figure ci-dessous résume ces mesures : (I)



c) Amortissement : Nous avons précisé que ce qui intéressait le musicien était la courbe de décroissance du son jusqu'au moment où celui-ci sort de l'aire d'audibilité. On peut facilement enregistrer cette courbe de décroissance pour une note de violon jouée en pizzicato à l'aide de l'enregistreur logarithmique. De cette courbe on peut déduire la constante de temps (inverse du coefficient d'amortissement K); celle-ci permet de déterminer le décrement logarithmique

$$(7) \quad \int = e^{\log K}$$

La capacité d'amortissement d'un matériau augmente généralement avec les contraintes (tension, dans le cas des cordes) pour un matériau donné. Mais nous venons de voir que si on augmente graduellement la tension d'une corde, on passe par des valeurs où il se produit des

(I) NOTA : On remarquera que pour cette corde de nylon la fréquence transversale monte plus vite que la fréquence de torsion; c'est pourquoi l'intervalle entre les deux notes varie. La loi est à peu près linéaire, mais elle varie avec le module de rigidité des matériaux. Une corde donnée n'est donc "bonne" qu'à des accords nominaux déterminés.



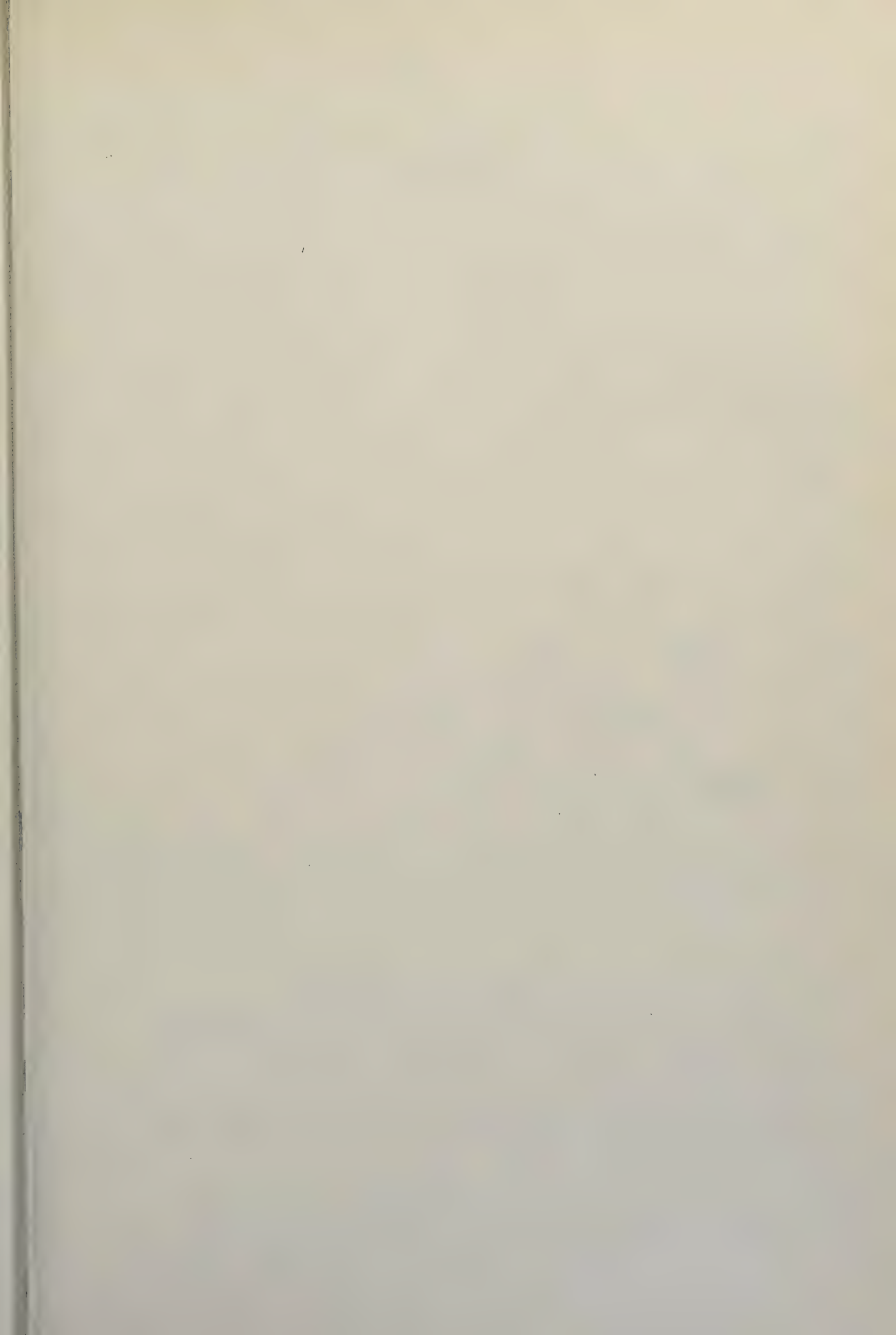
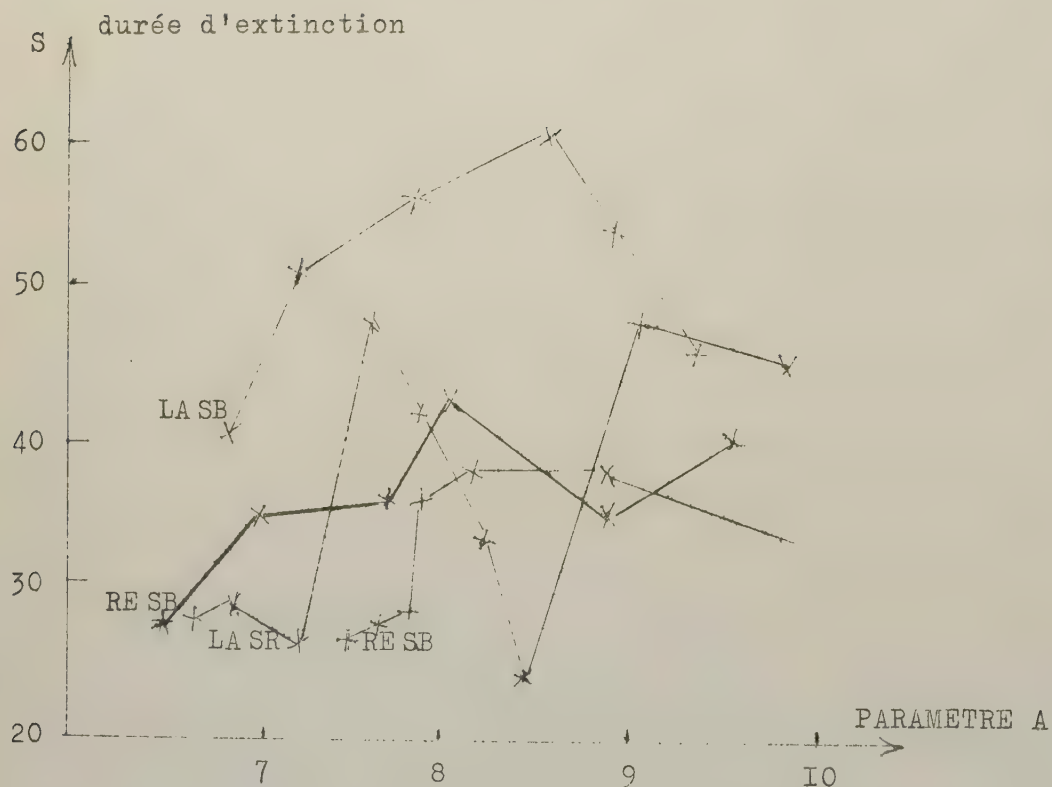


FIG. II



Variations de la durée d'extinction du son en fonction du paramètre sensible A (4 cordes différentes).

Une valeur optimum de A est 8.

Pour une même corde, les écarts sont considérables (du simple au double).

résonances internes déterminées par les paramètres sensibles A et B. On en conclut qu'à priori le décrétement d'une corde est fonction non seulement de la tension, mais encore des paramètres sensibles de la corde. En d'autres termes, les pertes d'énergie conditionnées par le frottement interne varient avec la fréquence transversale. Pour le vérifier, on a fait l'expérience suivante :

On tend des cordes de guitare (longueur 65 cm) sur un sonomètre massif (poids 30 kg); on excite la corde en l'écartant en son milieu d'une distance normalisée (1 cm). On observe directement la corde au microscope (grossissement 100 fois) et on mesure au chronomètre le temps qui s'écoule entre l'excitation et l'arrêt de la vibration, pour des tensions graduellement croissantes de la corde. La méthode est expéditive et suffisamment précise.

En portant en abscisse les variations du paramètre A et en ordonnée la durée d'extinction du son, on obtient des courbes irrégulières (Fig. II), mais on constate une augmentation notable de la durée d'amortissement autour de la valeur 8 du paramètre A (résonance d'octave de la fréquence longitudinale). On a vérifié d'autres anomalies correspondant aux valeurs remarquables du paramètre B définies plus haut: le phénomène est complexe en raison des interactions des 4 modes vibratoires de la corde, mais les mesures faites mettent en évidence de façon nette qu'une corde donnée possède un décrétement optimum pour une tension bien définie. Cet optimum est réalisé quand il y a concordance, au mieux, des résonances internes de la corde, celles-ci étant définies par les paramètres sensibles A et B.

d) Influence de la rigidité : On peut expliquer certaines pertes d'énergie par la rigidité des cordes.

Toute corde matérielle est rigide et de ce fait il faut apporter une correction à la formule de Taylor (3). Il en résulte une conséquence très importante: les partiels d'une corde ne coïncident pas avec les harmoniques du fondamental; la coïncidence est d'autant plus mauvaise que la corde est plus rigide. Or l'expérience montre que le mouvement résultant d'une corde entretenue est périodique: il se

produit donc un phénomène d'accommodation des partiels sur les harmoniques, mais celui-ci est accompagné de pertes d'énergie proportionnelles à l'écart entre partiels et harmoniques. Ceci justifie la pratique des fabricants de cordes (utilisation de cordes filées par exemple) qui cherchent par divers moyens empiriques à diminuer la rigidité des cordes.

Pour les cordes frappées ou pincées, le son n'est pas la superposition des harmoniques du fondamental: la vibration n'est pas périodique. L'écart entre partiels et harmoniques entraîne alors une "inharmonicité" qui a été étudiée par YOUNG (1): le timbre de la corde non entretenue est d'autant plus désagréable que le coefficient d'inharmonicité est grand. Celui-ci est donné par la formule déterminée par YOUNG pour des cordes de piano en acier :

$$(8) \quad i = \frac{1731}{2 \times 64} \cdot \frac{\pi^2}{N^2} \cdot \frac{d^2}{L^4} \cdot \frac{E}{\rho}$$

où d est le diamètre de la corde, N la fréquence fondamentale, L la longueur, E le module d'élasticité, ρ la densité.

La théorie d'élasticité (BOUASSE I) nous donne entre E et G (module de rigidité) la relation

$$(9) \quad G = E / 2 (1 + \nu)$$

où ν est le coefficient de Poisson défini comme étant le rapport entre la diminution relative du diamètre de la corde à l'augmentation relative de la longueur de la corde soumise à une traction donnée, soit :

$$\frac{\delta \phi}{\phi} : \frac{\delta L}{L^0} = - \nu$$

ϕ = diamètre de la corde au repos ; L = la longueur de la corde au repos ; $\delta \phi$ = maigrissement et δL = allongement.

Ces deux derniers paramètres matériels sont bien connus empiriquement des fabricants de cordes. En introduisant le coefficient de Poisson dans la relation déterminant le coefficient d'inharmonicité on obtient:

$$(10) \quad i = \frac{1731}{2 \times 64} \cdot \frac{\pi^2 d^2}{N^2 L^4} \cdot \frac{G \cdot 2 (1 + \epsilon)}{\mu}$$

L'inharmonicité, paramètre sensible des cordes, croît donc avec la rigidité, le coefficient de Poisson et le diamètre; elle est inversement proportionnelle au carré de la fréquence, à la puissance 4ème de L et à la densité. D'où l'intérêt d'utiliser des cordes longues à une fréquence élevée pour obtenir un rendement musical intéressant.

-°-°-

RESUME DU CHAPITRE III

Nous avons montré que :

1^a) Une corde isolée attaquée par un archet vibre de quatre façons distinctes dont aucune n'est négligeable :

- a) transversalement
- b) longitudinalement
- c) torsionnellement
- d) par dédoublement de fréquence (octave).

2^a) L'énergie déterminée par le frottement de l'archet est répartie entre ces quatre modes selon la structure de l'instrument et selon les constantes élastiques des matériaux.

3^a) Pour chaque type d'instrument il faut des cordes appropriées, dont il convient de justifier théoriquement les paramètres sensibles.

4^a) Les équations élémentaires de fonctionnement des cordes vibrantes déterminent les paramètres sensibles en fonction des propriétés physiques des matériaux et des conditions d'utilisation.

On a :

a) La fréquence longitudinale en hauteur absolue; celle-ci est fonction de la longueur, du module d'élasticité E et de la densité μ . Le timbre d'une corde est d'autant plus aigu que cette fréquence est plus élevée; l'impression auditive est d'autant plus marquée que cette fréquence se rapproche de la zone sensible de l'oreille. On a : $N_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\mu}}$.

b) Le paramètre sensible A, déterminé par l'intervalle entre le fondamental transversal et le fondamental longitudinal. Ce paramètre est fonction de E et de la tension par unité de surface de la section t_I . On a : $A = \sqrt{E / t_I}$.

Ce paramètre conditionne le degré de consonance ou de dissonance du timbre de la corde.

c) Le paramètre B, déterminé par l'intervalle entre le fondamental transversal et le fondamental torsionnel. Il est fonction de la tension par unité de surface de la section et par le module de rigidité de la corde. On a : $B = \sqrt{t_I / G}$.

Ce paramètre détermine la durée des transitoires et le caractère plus ou moins grave du timbre.

d) L'amortissement : fonction du frottement interne des matériaux employés et de la tension (contrainte), mais aussi des paramètres sensibles A et B: conditionne la durée d'extinction du son.

e) L'inharmonicité : fonction complexe de la rigidité du coefficient de Poisson et de la densité, pour une corde de dimensions et de fréquence données. Elle conditionne le rendement énergétique des cordes entretenues et la qualité de timbre des cordes frappées ou pincées.

CHAPITRE IV.1

ETUDE EXPERIMENTALE

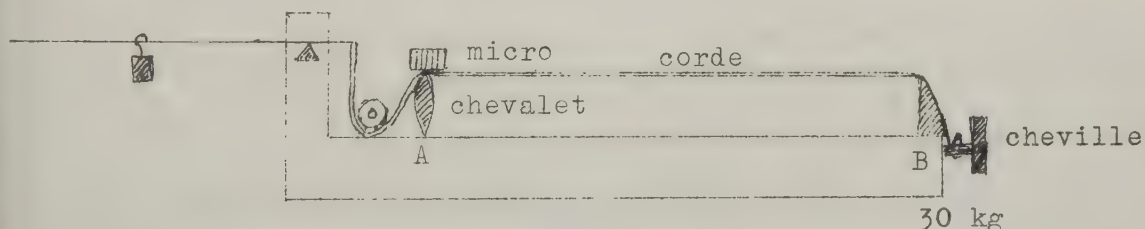
DE L'ADAPTATION DES CORDES ET DES INSTRUMENTS

—o—

12) TECHNIQUE DE MESURE :

Le chapitre précédent a montré l'existence de divers modes de vibration des cordes harmoniques, tous audibles, et étudié les relations entre grandeurs physiques des cordes isolées. Ce chapitre sera consacré à l'adaptation des cordes aux instruments.

a) Matériel : Pour l'étude des cordes isolées on a réalisé un banc d'essai permettant de relever la tension, la fréquence transversale, la fréquence longitudinale et torsionnelle ainsi que la durée de la décroissance des vibrations transversales.



Le dispositif comporte un socle de 30 kg, la cheville permet de rattraper l'allongement des cordes. On a vérifié que le chevalet délimite les vibrations longitudinales du segment de corde étudié. Le point B est fixe, mais le chevalet A oscille sur sa base (couteau); ainsi les fréquences longitudinales d'une corde mesurées à l'aide de ce dispositif sont identiques à celles de la corde isolée.

Mesure des fréquences : Les vibrations sont captées par un microphone piézo-électrique de faible masse (10 g) fixé sur le chevalet mobile et mesurées par la méthode des courbes de Lissajous sur un oscillographe cathodique à l'aide d'un générateur basses fréquences.

On a également utilisé un sonomètre classique équipé d'une corde d'acier de 25/100 de mm de $\varnothing$ et accordé à

l'aide d'un diapason étalonné. Ce sonomètre de 2 m de longueur permet des mesures précises et expéditives (précision de l'ordre de 0,5 %) entre 80 et 660 Hz. Les fréquences sont déterminées en fonction de l'inverse des longueurs; on a vérifié la précision du calibrage de la corde.

Pour les mesures de fréquences longitudinales on utilise le même sonomètre, mais en excitant la corde longitudinalement. Le dispositif permet de couvrir pratiquement toute la gamme acoustique utile ici (de 80 Hz à 8000 Hz).

b) Fiche caractéristique : Les résultats des mesures sont portés sur une fiche comportant les renseignements techniques intéressants, les paramètres sensibles définis plus haut et les conditions expérimentales (hygrométrie, température, tension, allongement etc). Pour les travaux expérimentaux 140 fiches de ce genre ont été utilisées. Les mesures se rapportent aux instruments traditionnels: violon, guitare, violoncelle, contrebasse, harpe etc. Elles ont eu pour but :

1) de déterminer les valeurs des paramètres sensibles établis empiriquement dans la fabrication des cordes traditionnelles;

2) de vérifier que ce sont bien ces paramètres sensibles qui déterminent la qualité des cordes;

3) d'établir les lois d'adaptation des cordes aux instruments (modification des conditions aux extrémités selon les types d'instruments et modifications corrélatives des paramètres sensibles);

4) de rationaliser la fabrication des cordes et instruments, en introduisant des moyens de contrôle et des équations d'équarissage.

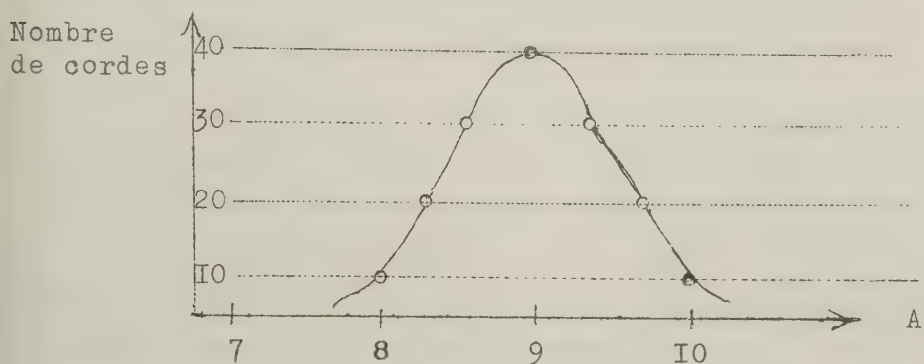
22) ETUDE DES CORDES DESTINEES A DIVERS TYPES D'INSTRUMENTS :

1) VIOLON : Nous avons d'abord étudié la corde SOL (198 Hz) parce que les phénomènes auditifs y sont les plus sensibles : les vibrations longitudinales (1500 à 2000 Hz) sont en effet placées dans la zone sensible de l'oreille.

Ces cordes, montées sur banc d'essai, étaient tendues à leur tension d'utilisation habituelle. Pour 200 cordes d'origines diverses

IV.3

et considérées généralement comme bonnes par les utilisateurs, on a obtenu un histogramme relatif au paramètre sensible A.



Cette expérience établit objectivement l'existence d'un optimum empirique recherché par les fabricants de cordes. La valeur numérique de cet optimum (9) est valable exclusivement pour des cordes montées sur le banc de mesures rigide, c'est à dire dans des conditions sans rapport avec l'utilisation réelle, puisque dans un instrument les points d'attache sont essentiellement mobiles. On pourrait penser en conséquence, que les mesures de cordes sur banc d'essai sont impropres et qu'on devrait faire les mesures sur l'instrument. En fait, cet inconvénient est mineur dans la mesure où la correction à apporter est connue et peu variable à l'intérieur d'un type d'instrument donné.

Pour connaître l'importance de cette correction, nous avons sélectionné une corde type (paramètre sensible $A = 9$) et nous l'avons montée successivement sur 24 instruments de même type, mais de fabrication différente. Les valeurs extrêmes du paramètre A de cette corde montée sur instrument sont 7,7 et 8,3, soit environ 8 en moyenne. Les conditions aux extrémités font donc tomber le paramètre A de 9 à 8 approximativement dans le cas du violon. La correction est d'environ $1/9$ dans ce cas.

Cette valeur type pour le paramètre A peut d'ailleurs être différente même dans le cas du violon si l'on recherche un timbre particulier, plus perçant, par exemple (jazz). Au lieu d'utiliser le boyau, on choisit alors un matériau comme l'acier, en jouant sur les paramètres physiques de la formule de Taylor de façon à obtenir une tension totale identique à celle de la corde boyau.

Nous avons utilisé de telles cordes; le paramètre sensible A

est alors voisin de I6 (sur banc de mesure); le paramètre A réel sur l'instrument (correction I/9) est égal à $I6 \times 8 : 9 = I4,2$. Cette corde aura donc sur l'instrument un timbre plus clair et plus acide que le boyau (l'harmonique I4 étant plus aigu et dissonant).

Nous avons établi un histogramme identique au précédent pour le paramètre sensible B, relatif aux mêmes cordes (200); les valeurs préférentielles moyennes sont ici 2 (octave) et I,5 (quinte); l'expérience a montré qu'il n'y a pas de correction à apporter au paramètre B d'une corde montée sur instrument (les conditions aux extrémités ne jouent pas de rôle notable ici).

L'ensemble de ces travaux a été repris pour les trois autres cordes du violon. Dans un instrument de ce type, il est souhaitable que les cordes aient une tension voisine (pour éviter un glissement latéral du chevalet sur la table). Dans ces conditions, si on désire obtenir un paramètre sensible A identique pour deux cordes voisines accordées à la quinte, il faut aussi que leurs longitudinaux respectifs soient accordés à la quinte. Si on utilise pour ces deux cordes des matériaux de module d'élasticité identiques, il faut donc accorder la fréquence longitudinale en jouant sur la densité, comme l'indique la formule (4)

$$N_{\ell} = \frac{I}{2L} \sqrt{\frac{E}{\mu}}$$
 . En fait, les fabricants de cordes utilisent pour les deux cordes voisines le même matériau (boyau) et modifient la densité moyenne de la corde en la "filant", c'est à dire en posant sur le boyau un fil "trait" de métal dont on peut varier la nature et le diamètre. Les fabricants sont amenés à utiliser des métaux usuels, ductiles et de faible prix de revient: argent, cuivre, aluminium; en recherchant le calibre de trait approprié, on peut obtenir toutes les densités (densités moyennes de la corde filée) nécessaires en pratique.

En résumé, le talent du fabricant de cordes consiste à régler les paramètres sensibles selon le type d'instrument auquel les cordes sont destinées, en agissant sur les constantes qui interviennent dans leur expression, tout en respectant d'autres conditions restrictives: tension totale de la corde, solidité, etc.

Tout ce que l'on vient de voir montre que les aspects théorique, expérimental et subjectif du problème des cordes convergent

vers des valeurs précises des paramètres sensibles dont nous avons donné l'expression.

2) ETUDE DES CORDES DE GUITARE : L'expérimentation a porté sur environ 500 cordes. Les relevés systématiques du paramètre A des cordes MI grave de guitare (MI I, 82 Hz) donnent une courbe en cloche identique à celle qui a été relevée pour le violon, avec différence essentielle que la correction relative aux extrémités est pratiquement nulle.

En effet, la corde de la guitare classique est fixée au chevalet très bas qui est collé sur la table; il n'y a ni cordier, ni voûte de table; les cordes sont parallèles à la table plate: celle-ci travaille en bois debout et le degré de liberté longitudinale aux points de fixation est faible. Conséquence: les mesures de la fréquence longitudinale sur sonomètre et sur instrument sont sensiblement identiques.

Ainsi, en définitive, le paramètre sensible A sur l'instrument a la même valeur aussi bien pour le violon que pour la guitare, conformément à l'hypothèse générale que nous avons émise plus haut.

Mais une corde bien adaptée pour le violon ne peut l'être également pour la guitare (puisque une correction est nécessaire dans le cas du violon), même si la tension totale est identique, ce que les praticiens savent bien.

Le paramètre B est d'importance plus secondaire pour la guitare puisqu'il s'agit de cordes pincées où les mouvements torsionnels de la corde sont moins importants (en amplitude surtout). Cependant les guitaristes savent modifier le timbre de leur instrument en attaquant les cordes différemment, soit avec le gras du doigt, soit avec l'ongle; dans le deuxième cas, à amplitude transversale identique, on vérifie que le mouvement torsionnel de la corde est d'amplitude négligeable: le timbre général est moins grave, moins "rond" ce qui est conditionné par l'absence de la composante grave torsionnelle. L'importance auditive de cette composante a été mise en évidence tout particulièrement lors de travaux sur les cloches (GRUTZMACHER).

3) ETUDE DES CORDES DE VIOLONCELLE ET DE CONTRE-BASSE : Le problème est identique à celui du violon, aux corrections près: en

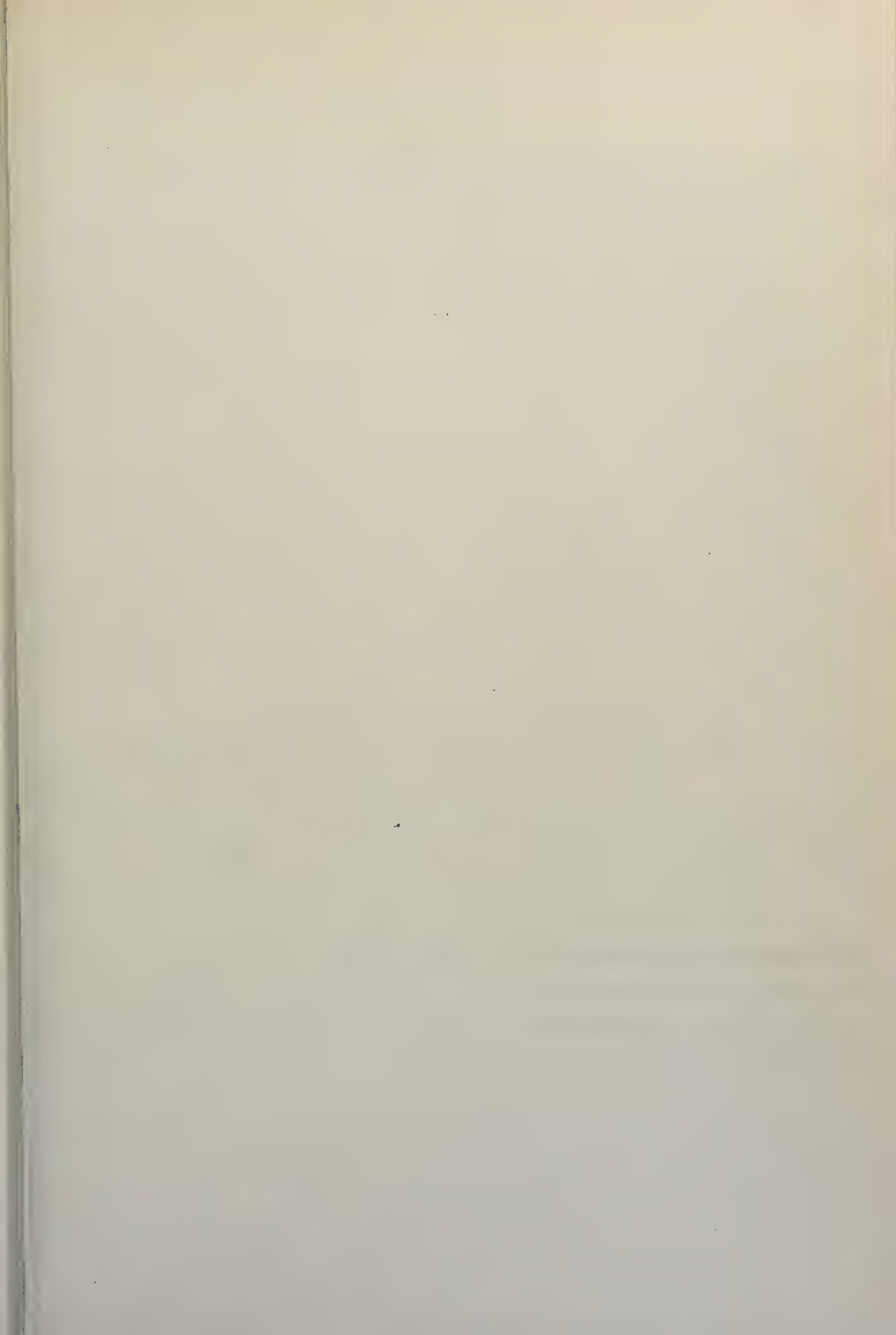
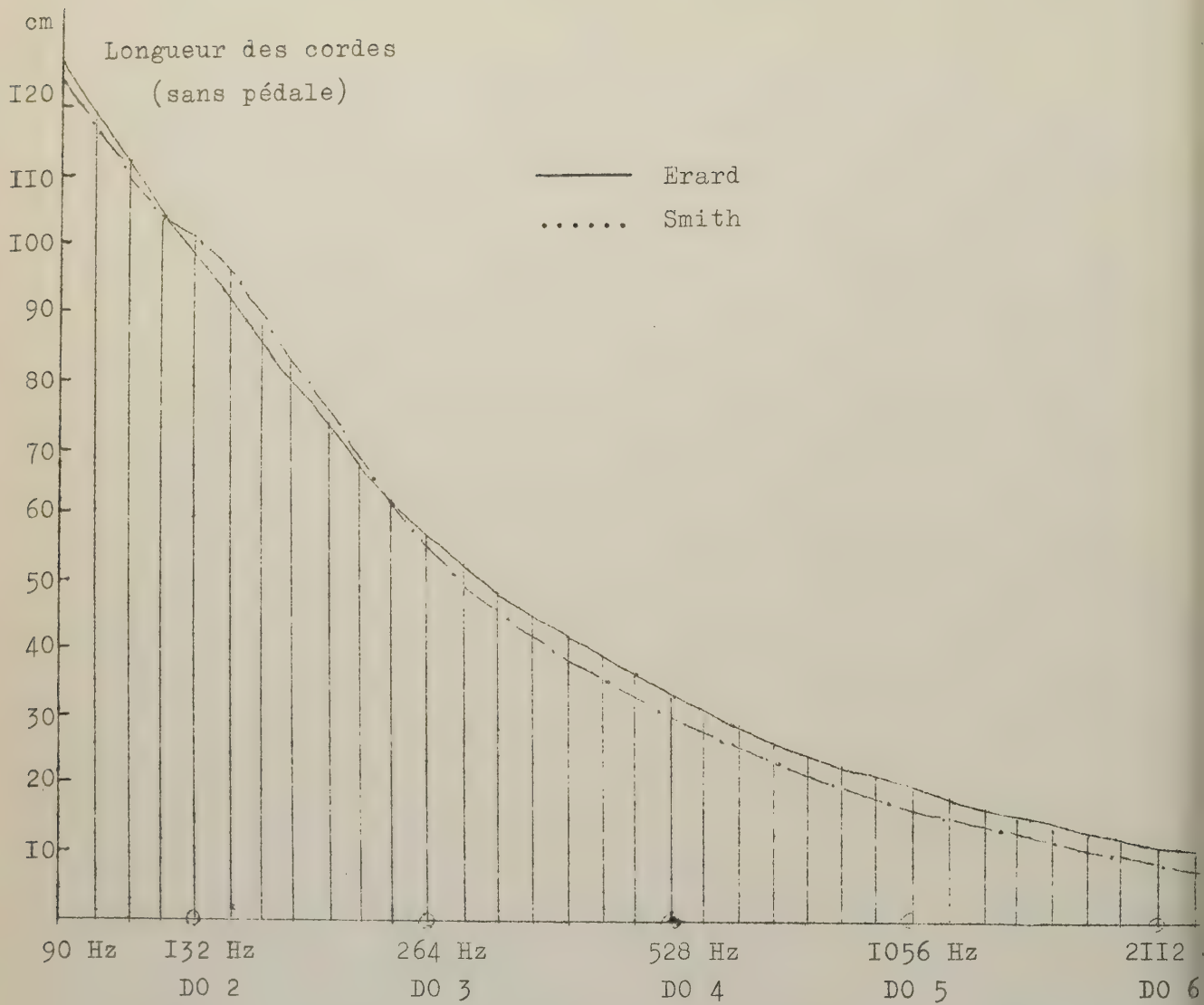


FIG. 12



Les longueurs traditionnelles des cordes de harpe suivent à peu près la loi de sensibilité de l'oreille à 40 dB. Comme l'instrument ne comporte pas d'étouffoir, ces cordes sont très tendues; le coefficient d'amortissement est élevé; le paramètre A est faible.

effet, les conditions aux extrémités sont très différentes dans les deux cas, parce que les instruments ne sont pas géométriquement semblables. D'autre part, si les dimensions sont bien normalisées pour le violon, il n'en va pas de même pour la contre-basse. Les contrebassistes semblent d'ailleurs moins sensibles à la qualité de leurs cordes ce qui s'explique par la tessiture très grave de leur instrument (limite grave: 41 Hz) : on se trouve à la limite de sensibilité effective de l'oreille, d'où une plus grande indifférence.

Une trentaine de mesures des fréquences longitudinales de cordes de contre-basse variées ont cependant montré que cette fréquence se situait dans la zone sensible de l'oreille: pour un jeu de cordes acier de contre-basse les fréquences longitudinales varient de 880 à 1045 Hz, pour un jeu de cordes classiques (boyau) de 780 à 850 Hz. On voit donc que les fabricants de cordes destinées à des instruments de tessiture grave cherchent à placer empiriquement une partie de l'énergie acoustique dans la zone sensible de l'oreille.

4) LA HARPE (Fig. 12) : Un relevé des longueurs de cordes de deux harpes classiques (ERARD et SMITH) montre que la décroissance de ces longueurs est exponentielle et qu'elle coïncide à peu près avec les courbes d'isotonie de l'oreille, à 40 dB.

Comme on désire ici un amortissement rapide du son, les cordes utilisées traditionnellement sont très fortement tendues (de 20 à 40 kg); la moyenne de tension par unité de surface est plus que double ($5/13^2$). Pour les cordes de boyau nues, le paramètre A est alors plus faible que dans le violon en conformité avec la relation précédemment définie $A = \sqrt{E/t_I}$. Par conséquent, le timbre particulier de la corde de harpe diffère de celui des autres cordes instrumentales. Les phénomènes vibratoires longitudinaux ont d'ailleurs ici une importance particulière. En effet, la table de la harpe est constituée par un trapèze en épicea; les cordes sont fixées sur une ligne médiane du trapèze et forment avec le plan de la table un angle d'environ 35° : ce sont donc surtout les modes longitudinaux (vibration d'octave et fréquence longitudinale des cordes) qui sont amplifiés, d'où le timbre particulier de la harpe.

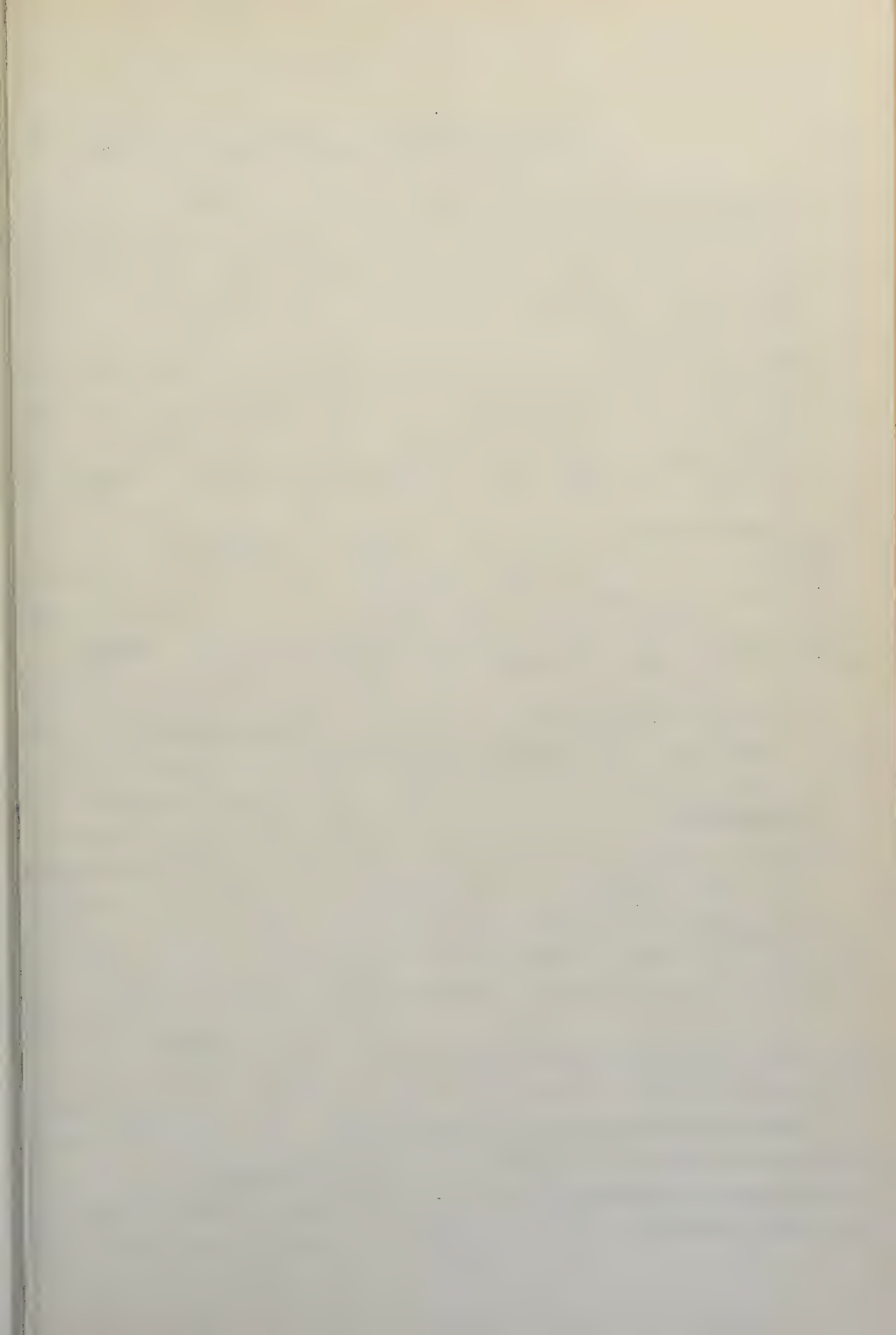
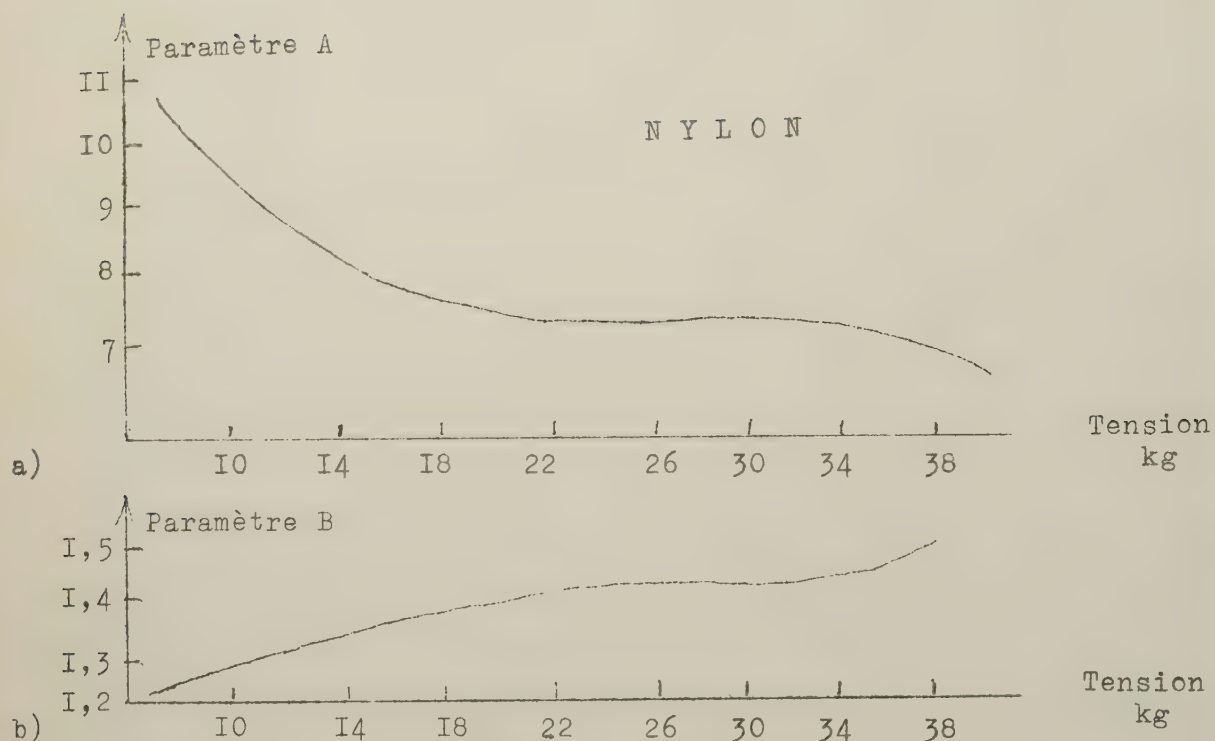
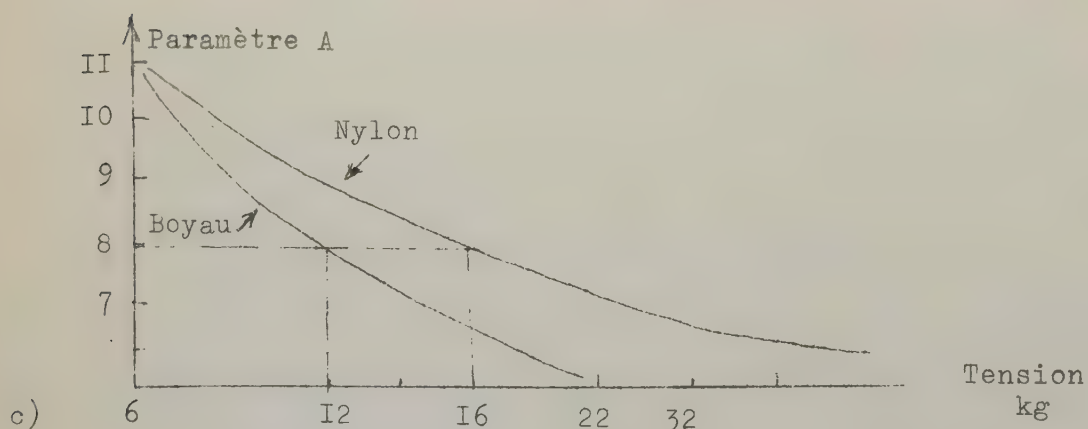


FIG. 13



Variation des paramètres A et B avec la tension; entre 20 et 35 kg A est indépendant de la tension.



Comparaison entre boyau et nylon à ϕ égal.

Une même valeur du paramètre A est atteinte avec des tensions différentes. Exemple: on a $A=8$ respectivement à 12 et 16 kg.

32) INFLUENCES DIVERSES SUR LES FACTEURS SENSIBLES :

a) TENSION : Les expressions des paramètres sensibles A et B montrent que ceux-ci sont des fonctions linéaires de la tension par unité de surface de la section

$$A = \sqrt{\frac{E}{t_I}} \qquad B = \sqrt{\frac{t_I}{G}}$$

Cela n'est exact qu'en première approximation. En effet, les matériaux, utilisés à des tensions notables, s'approchent parfois de la rupture et sont sujets par conséquent à des déformations permanentes. Il est donc intéressant d'étudier les variations des paramètres sensibles avec la tension.

1er Exemple : Prenons un monofilament de nylon de 50 cm de longueur et $I38/I00^2$ de mm, tendu sur le banc de mesures. On mesure les paramètres sensibles A et B en augmentant graduellement la tension entre 6 et 40 kg. On obtient le graphique suivant (Fig. I3 a et b) dans lequel on porte en abscisse les tensions et en ordonnée les valeurs numériques des paramètres sensibles A et B. On voit que la décroissance de A est sensiblement exponentielle jusque vers 25 kg; à partir de cette valeur, la courbe possède une partie horizontale montrant que le paramètre A est, ici, indépendant de la tension. Cette courbe présente un intérêt musical considérable: on y lit directement à quelles tensions le paramètre A présente une valeur optimum pour un cas déterminé. On peut aussi porter en abscisse la tension par unité de surface de la section, au lieu d'y mettre la tension totale (en divisant les tensions portées sur cette courbe par la section): cette nouvelle courbe permet de déterminer la section qu'il convient de donner à une corde de ce matériau pour obtenir un paramètre A désiré etc.

On a également établi les variations du paramètre B dans les mêmes conditions. On peut ainsi lire directement à quelles tensions une valeur intéressante de A coïncide avec une valeur intéressante de B.

2^e Exemple (Fig. I3 c) : Pour mettre en évidence la différence entre le boyau et le nylon, on a relevé le paramètre A de deux cordes de $I40/I00$ de mm de diamètre. Le graphique montre qu'à tension identique

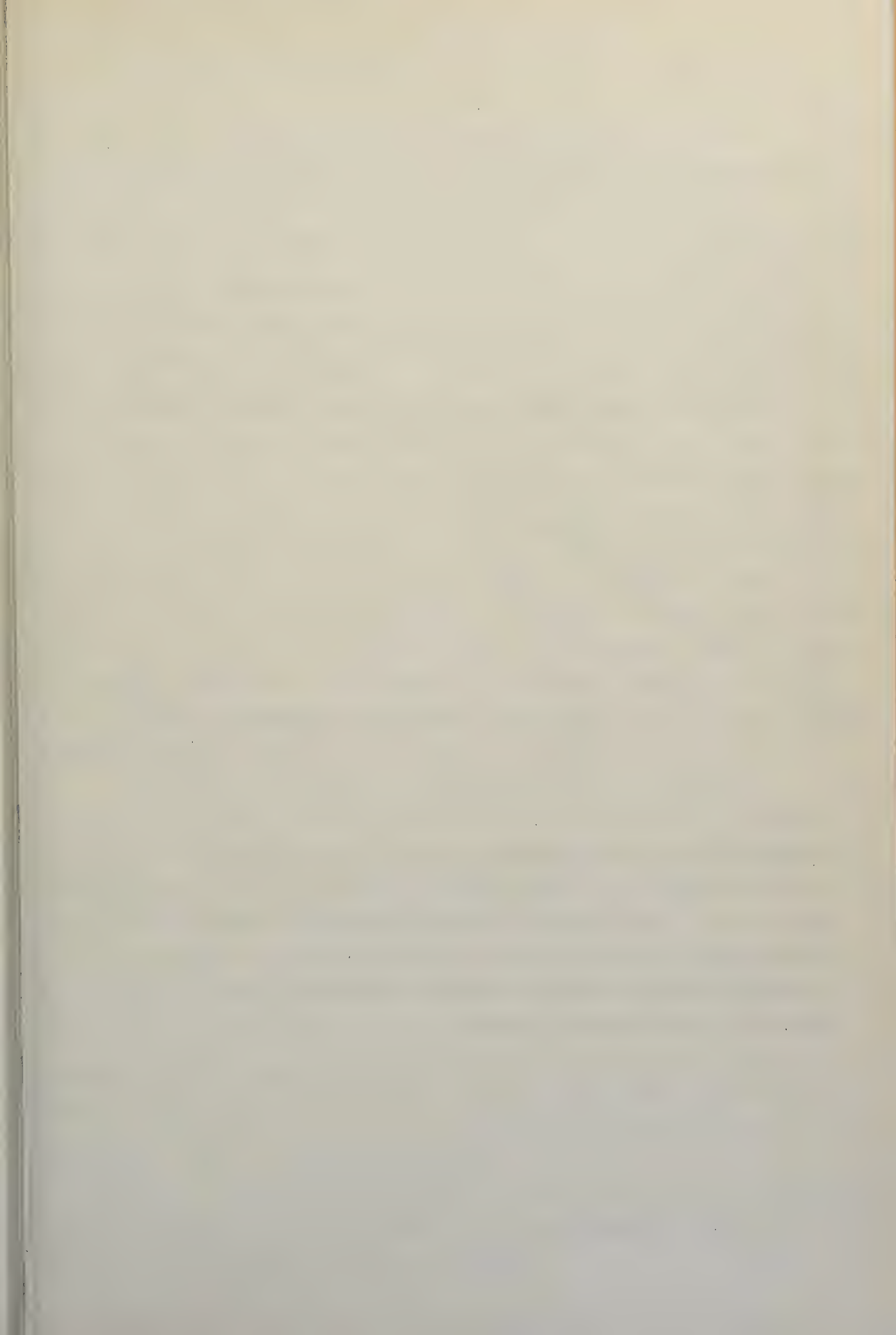
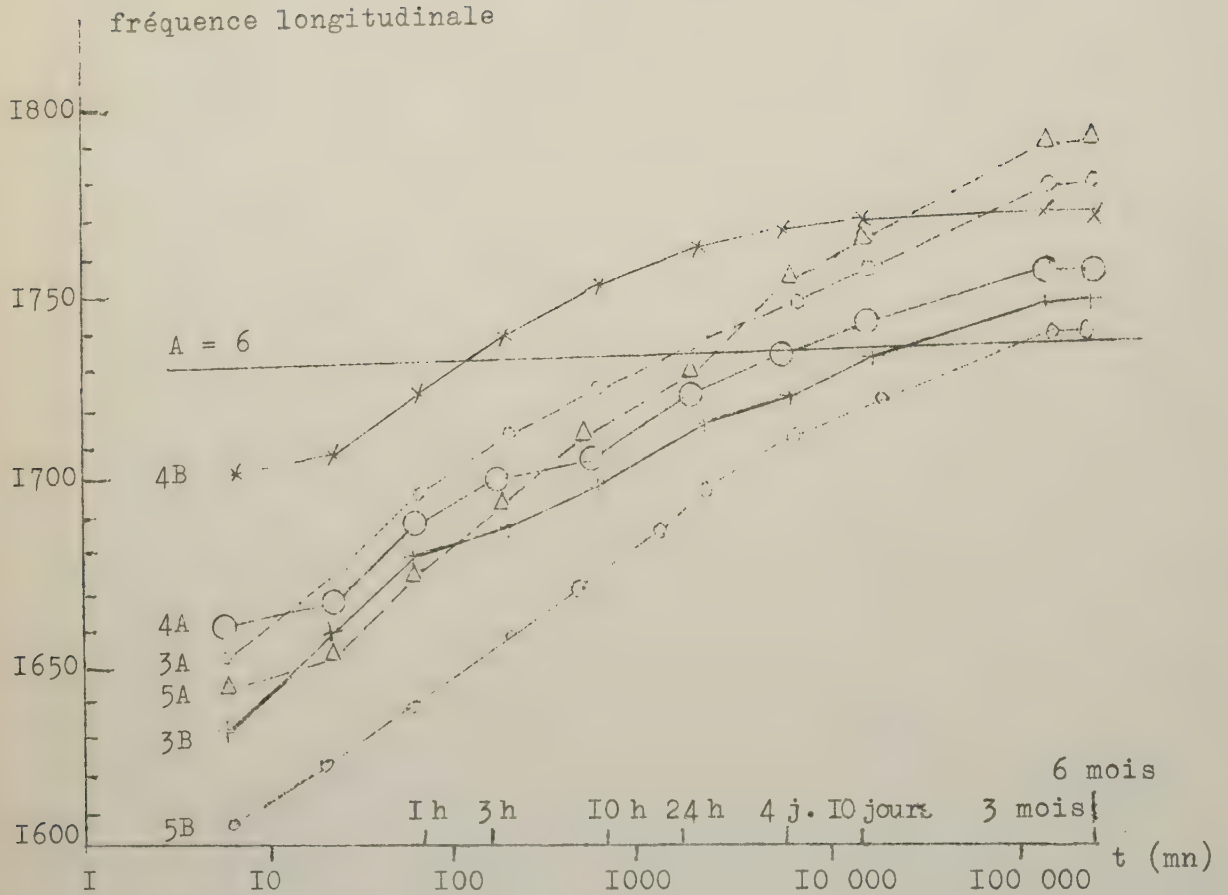


FIG. 14



Stabilisation de 6 cordes boyau (origine différente).

Si un paramètre A de valeur numérique 6 est désiré, cette valeur est atteinte à des instants différents (valeurs extrêmes: 1 h pour le boyau 4B ; 3 mois pour le boyau 5B). L'échelle du temps étant logarithmique, on voit que la stabilisation est à peu près une fonction logarithmique du temps.

les deux cordes ont un paramètre A très différent; inversement, le boyau à 12 kg a le même paramètre A que le nylon à 16 kg. Ceci montre qu'on ne peut obtenir un résultat acoustique identique avec des cordes en boyau ou en nylon indifféremment. Le fait est bien connu des praticiens.

b) STABILISATION (Fig. I4) : Toute corde soumise à des contraintes notables subit des déformations permanentes: ses propriétés élastiques se modifient; il importe donc de savoir dans quelles conditions et dans quelle mesure les modifications deviennent sensibles. Les instrumentistes utilisant des cordes harmoniques savent qu'une corde montée sur un instrument ne trouve pas immédiatement sa "sonorité" définitive: elle "s'affaiblit" et atteint au bout d'un temps variable une stabilité relative.

On a monté sur banc de mesure 6 cordes en boyau, ϕ 73/100, tension 8500 g (accord nominal RE 3 = 288 Hz environ; 60 % d'humidité relative, température 20°). On porte en abscisse le temps en échelle logarithmique (en minutes) et en ordonnée la fréquence longitudinale. La fréquence transversale des cordes étant fixe (réaccordage à 288 Hz à chaque mesure), le paramètre A varie comme la fréquence longitudinale puisque $A = N_1 / N$ par définition. Une valeur remarquable de A est atteinte pour $N_1 = 1730$ Hz ($A = 6$).

Le graphique met en évidence les points suivants :

- Toutes les cordes utilisées indiquent une montée de leur fréquence longitudinale quand elles sont soumises à tension continue; corrélativement le paramètre A augmente; quand l'instrumentiste dit que la corde se fait cela correspond donc bien à une réalité objective.
- Si on considère $A = 6$ comme valeur optimum (soit 1740 Hz pour N_1), on voit que la corde 4B atteint cette valeur après 2 heures environ; la corde 5B n'y arrive qu'après 6 mois de tension environ.
- Quand la corde dépasse 1730 Hz, on s'écarte à nouveau de la valeur optimum; ce phénomène est bien connu des instrumentistes; ils disent que la corde "meurt" et la rejettent alors qu'elle ne présente pas d'usure mécanique: c'est une usure acoustique.
- La pente de la corde 3B est beaucoup plus forte que celle de 4B; conclusion: la corde est plus sensible à la stabilisation, fait bien connu aussi des utilisateurs de cordes en boyau.



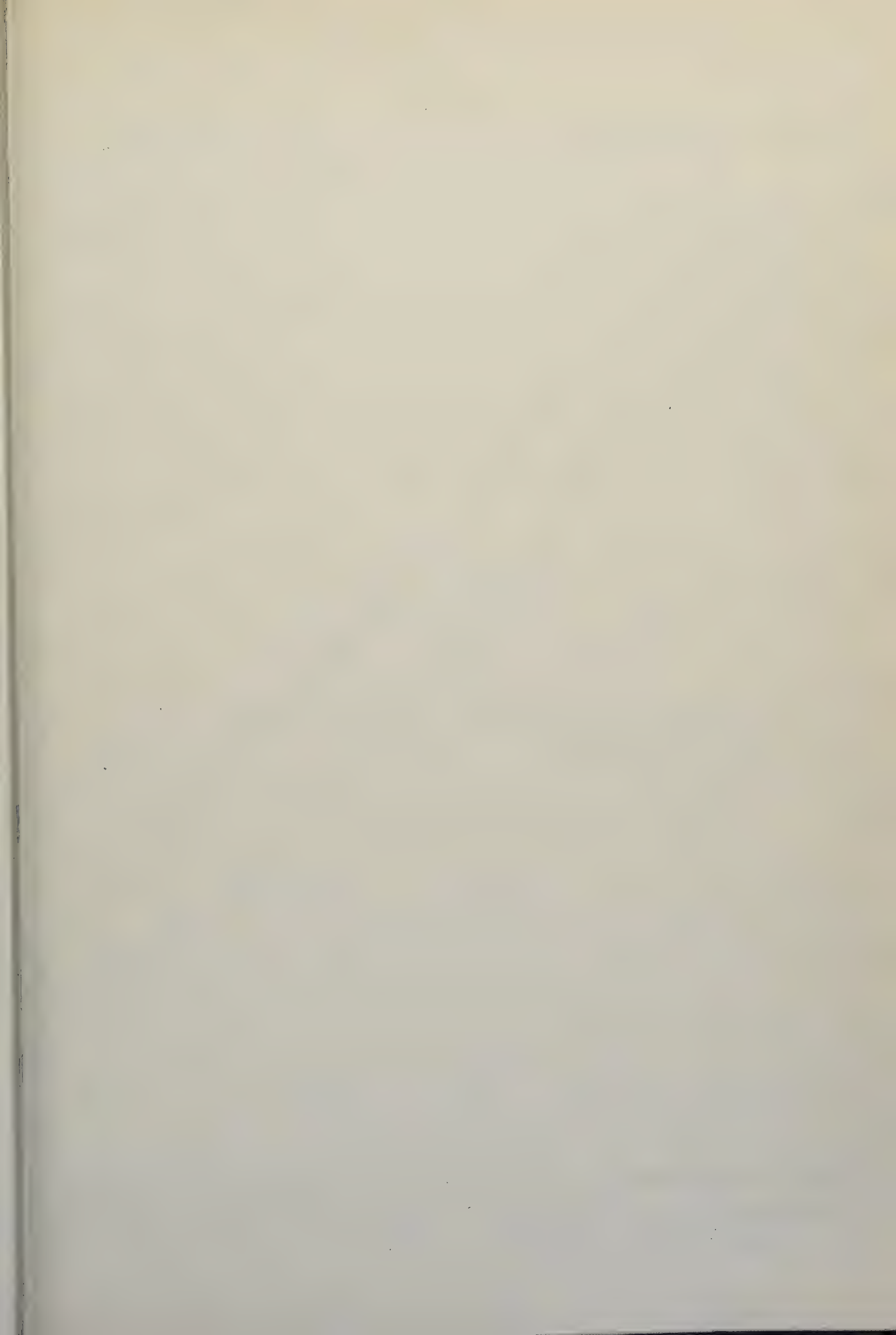
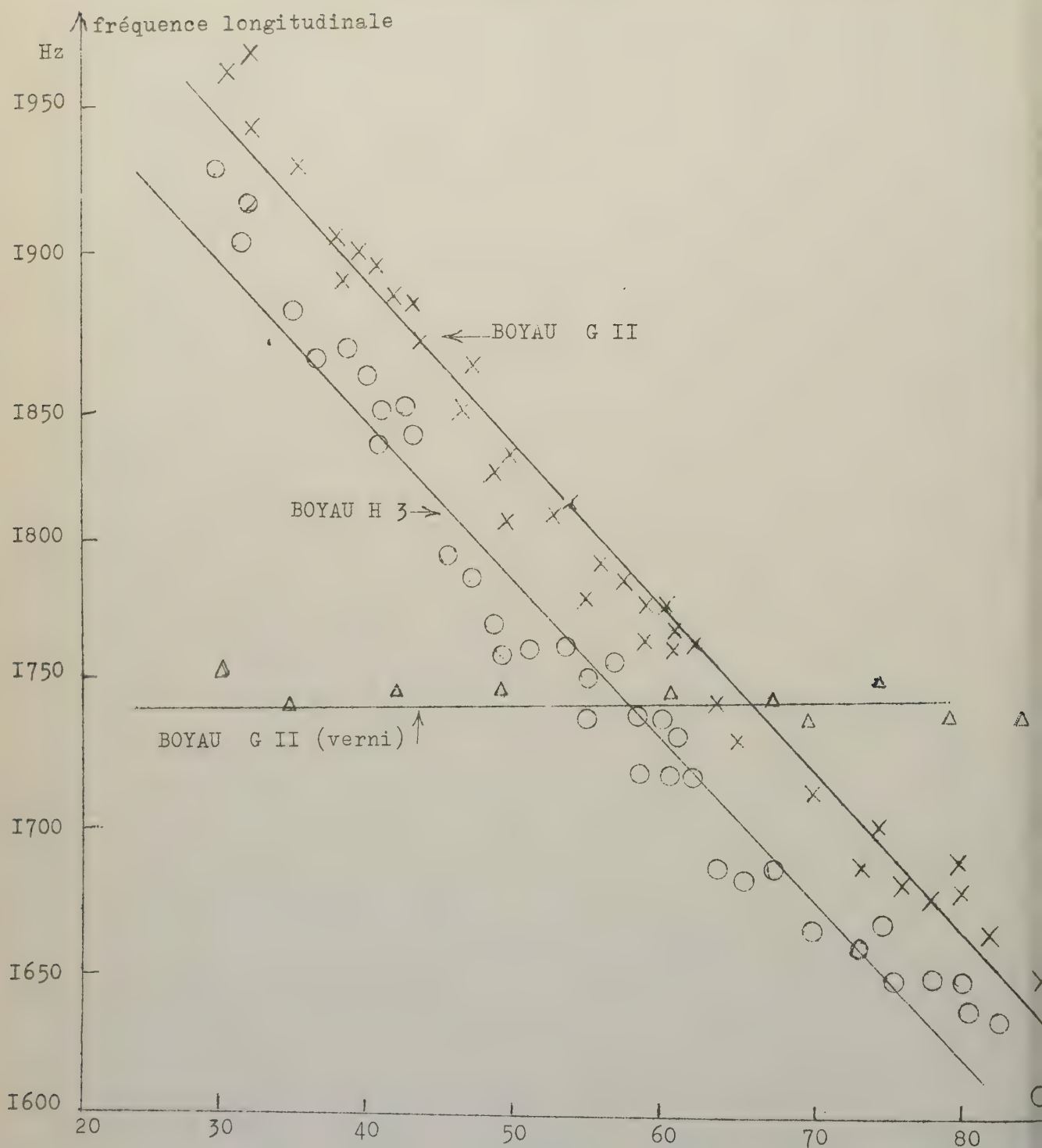


FIG. 15



Pour le boyau naturel (G II et H 3), la fréquence longitudinale varie considérablement avec l'humidité; d'où modification du paramètre sensible et corrélativement du timbre de la corde.

- La forme moyenne des courbes est plus ou moins rectiligne: la "stabilisation" est une fonction logarithmique du temps.
- Il s'agit ici de boyaux d'origine géographique différente; on voit que ce matériau présente des fluctuations importantes consécutives aux différences du module d'élasticité et de la densité, prévisibles à priori.

c) INFLUENCE DE L'HUMIDITE : Les cordes utilisées sur des instruments de musique sont en acier, en nylon ou en boyau. On a vérifié que la fréquence longitudinale était indépendante de l'hygrométrie pour les cordes en acier et en nylon, mais varie pour la plupart des autres matériaux non métalliques; d'où l'intérêt d'étudier ces variations.

Expérience : On donne ici les résultats de 4 cas typiques (Fig. I5) :

- 1) une corde nylon
- 2) une corde GII en boyau verni (vernis cellulosique)
- 3) une corde GII en boyau naturel (surface non huilée)
- 4) une corde H3 en boyau de même origine que la corde GII, mais ayant subi un traitement chimique particulier.

Ces cordes de $\varnothing 60/100^2$ de mm sont tendues sur banc de mesure (longueur utile 65 cm). Température 20°. On fait varier le degré hygrométrique ambiant de 30 à 90 %. Les mesures sont faites à 24 heures d'intervalle (après modification du degré d'humidité) afin que les échanges d'humidité puissent se réaliser de façon suffisante.

Conclusions :

a) Pour le nylon, la fréquence longitudinale est pratiquement indépendante du degré hygrométrique de l'air ambiant aux conditions usuelles d'emploi (mesures extrêmes 2600 ± 20 Hz). Les écarts sont de l'ordre de grandeur des erreurs expérimentales.

b) Les variations de la fréquence longitudinale de la corde boyau verni sont également négligeables.

c) La fréquence longitudinale de la corde boyau naturel GII passe de 1640 Hz à 1960 Hz entre 90 et 30 % d'humidité. Il y a un glissement corrélatif du paramètre A de la corde, c'est à dire modification du timbre. Ce glissement est important (77 savarts, plus d'un ton et demi). La loi est à peu près linéaire: la fréquence longitudinale est fonction



du degré hygrométrique.

d) Les propriétés de la corde H3 sont sensiblement identiques à celles de la corde précédente. La fréquence longitudinale passe de 16 à 1925 Hz entre 90 et 30 % d'humidité. Les pentes des deux cordes GII et H3 (et par conséquent la sensibilité des deux boyaux à l'hygrométrie) sont pratiquement identiques; l'écart provient d'une modification du module d'élasticité consécutive au traitement de la corde.

Ces mesures confirment l'expérience courante empirique des luthiers et fabricants de cordes harmoniques (MAILLOT). Les instrumentistes professionnels préfèrent les cordes nylon (guitare) et acier (violon etc) parce que le son reste stable quand l'hygrométrie varie.

On notera aussi que des travaux sur cordes harmoniques n'ont pas de sens qu'en tenant compte du degré d'humidité relative.

d) L'INFLUENCE DU VERNISSAGE : Nous dirons quelques mots sur ce problème parce qu'il s'est créé autour du violon tout un romantisme relatif au vernis dont les anciens luthiers couvraient leurs instruments (HILL, GREILSAMER I, TOLBECQUE etc).

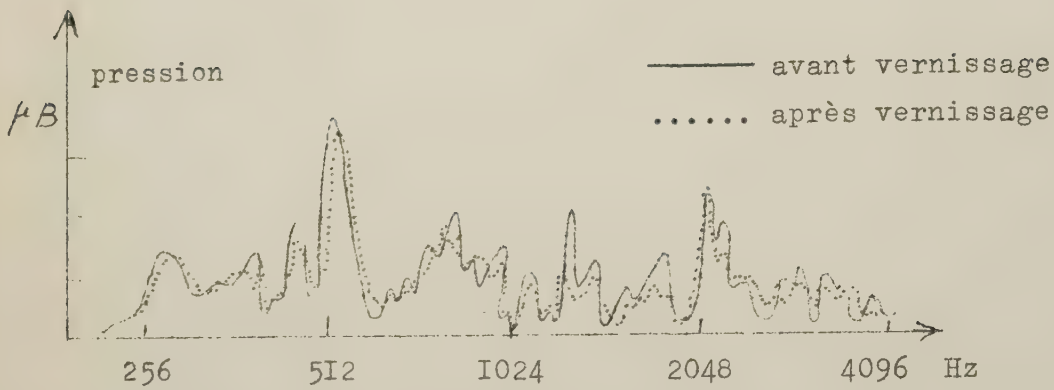
Expérience : Nous avons verni, après stabilisation, une corde en boyau (longueur 60 cm; $\varnothing$ 90/100; accord SOL2 198 Hz); le vernis utilisé est un vernis à la gomme laque; l'épaisseur de la couche de vernis est de l'ordre de 1/100^e de mm. On a mesuré le paramètre sensible A avant et après vernissage et trouvé respectivement 8,40 et 8,30. L'écart est pratiquement négligeable: il provient de la différence entre la densité du boyau (1,30) et de la gomme laque (1,

On a ensuite enduit une corde identique d'huile de lin. Celle-ci pénètre plus ou moins le boyau par capillarité: le paramètre A passe de 8,45 à 8,05. En cas de pénétration l'influence du vernis peut donc être notable; selon la capillarité du matériau et la densité du produit utilisé pour vernir, les résultats sont donc variables à l'extrême: on modifie en même temps de façon sensible la densité de la corde et son module d'élasticité.

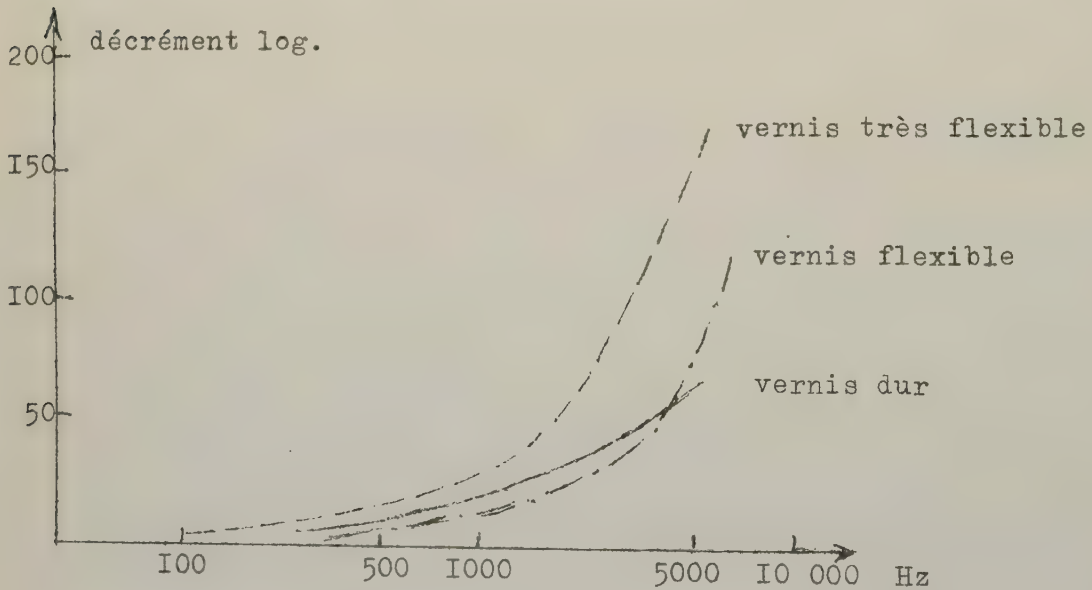
Pour vernir les instruments, on utilise des vernis superficiels légers (à base de gomme laque, de mastic et de sandaraque); ces vernis dont le solvant est habituellement l'alcool pénètrent



FIG. 16



- a) La courbe de réponse d'un violon est modifiée par le vernis, mais l'influence de celui-ci est relativement faible par rapport à d'autres paramètres (épaisseurs des tables par exemple). (Meinel)



- b) Le vernis modifie le décrément logarithmique d'éprouvettes de bois (épicéa). (Meinel)

très peu le bois; les constantes physiques de celui-ci ne sont donc pratiquement pas modifiées. Mais on utilise aussi parfois des vernis dont le solvant est l'huile de lin; la pénétration dans le bois est alors importante (surtout pour l'épicéa) et les modifications des propriétés des bois peuvent être importantes. Il est vrai que dans ce cas les luthiers appliquent habituellement un "encollage" sur le bois, celui-ci étant destiné à empêcher l'absorption par capillarité. Dans ce cas, le rôle du vernis ne peut être que faible. C'est ce qu'ont montré des travaux précis de MEINEL (3 et 4). Cet auteur a relevé les courbes de réponse d'instruments avant et après vernissage (Fig. I6 a). Les différences des deux courbes sont très faibles; l'amplitude générale est un peu plus petite; par contre le vernis augmente le coefficient d'amortissement (et par conséquent le décrétement), la différence étant sensible aux hautes fréquences (Fig. I6 b). Les résultats varient avec la capillarité des bois, la souplesse des résines employées, le mode d'application (avec ou sans encollage), la dilution du vernis etc. De plus, certains produits comme l'huile de lin s'oxydent très lentement (durée: plusieurs années pour l'huile de lin crue); toutes ces fluctuations expliquent les divergences entre les observations empiriques: c'est chaque fois un cas particulier.

e) LA JUSTESSE DES CORDES HARMONIQUES : Le physicien appelle "justes" des cordes dont divers segments présentent les mêmes propriétés (fréquences transversales identiques pour des segments de longueur équivalente). Or nous avons présenté à des instrumentistes des cordes répondant à cet idéal et elles ont été jugées plus ou moins fausses. Des mesures systématiques ont montré alors que la rigidité variable entre cordes voisines expliquait ce paradoxe. En effet, un violoncelliste apprécie la justesse en jouant en double cordes des quintes successives: une corde n'est appréciée comme juste par un instrumentiste que si les deux cordes voisines ont une rigidité identique, c'est à dire présentent une correction semblable de la rigidité, comme il a été défini par la relation (3). Si la rigidité des 4 cordes est régulièrement croissante, l'instrumentiste corrige instinctivement et n'est pas gêné dans son jeu



Conclusion : la définition de la justesse d'une corde est différente selon le point de vue auquel on se place. Les fabricants de cordes se contentent de calibrer leurs cordes traditionnelles: ils admettent qu'une corde de violoncelle présentant sur sa longueur utile des écarts inférieurs à 2/100 de mm est juste. Cette définition semble suffisante en pratique étant donné les fluctuations résultant du jeu (15 à 20 cents, soit 5 savarts de part et d'autre de la note désirée selon les mesures de GREENE, VAN ESBROEK et MONTFORT).

-o-o-

RESUME DU CHAPITRE IV

1^a) Nous avons décrit un banc d'essai de cordes permettant de faire le relevé des paramètres sensibles et d'établir une fiche caractéristique des cordes.

2^a) Nous avons déterminé les valeurs des paramètres sensibles des cordes isolées et ceux des cordes montées sur divers instruments (violon, violoncelle, guitare, harpe etc). Nous avons montré que les paramètres sensibles des cordes isolées n'étaient pas ceux qui interviennent quand la corde est montée sur un instrument: il faut apporter une correction selon les conditions aux extrémités.

3^a) a) Nous avons montré que les paramètres sensibles d'une corde varient en fonction de la tension par unité de surface de la section droite.

b) Ils varient avec la contrainte, par suite des déformations permanentes.

c) Ils varient de façon considérable avec l'hygrométrie quand il s'agit de matériaux hygroscopiques.

d) Le vernissage modifie les paramètres sensibles en raison directe de la pénétration du vernis dans le matériau.

e) La justesse des physiciens n'est pas la justesse des musiciens quand il s'agit d'instruments à cordes: les variations de rigidité entre cordes voisines expliquent ce paradoxe.

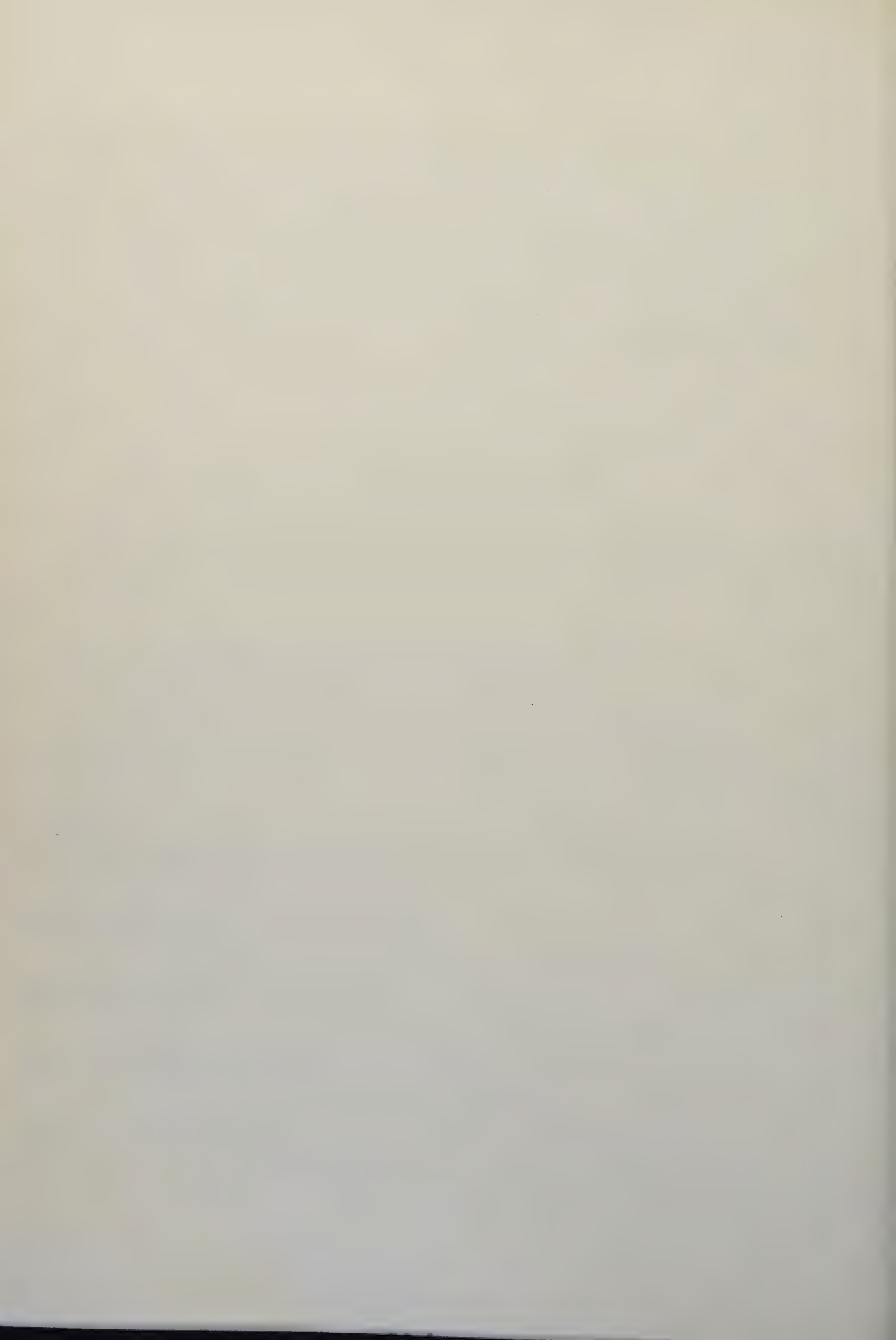




FIG. 17

SOL	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
RE		2	3	4	5	6			7	8		9	10	11	12	13		14		15	16	17		18			
LA			2		3	4			5		6		7		8			9		10		11		12			
MI					2				3		4				5			6				7					8

Tableau des harmoniques communs entre les cordes du violon. Il arrive que trois cordes aient des harmoniques communs (harmonique 9 du SOL) ou 4 cordes (harmonique 27 du SOL): on a alors des surrésonances.

CHAPITRE V.I

L'INSTRUMENT DE MUSIQUE ET LE SIGNAL MUSICAL

SPECTRES ET FORMANTS

—o—o—o—o—o—o—o—o—o—

Dans les chapitres précédents on a montré :

- la coexistence des divers modes de vibration;
- les relations entre ces modes;
- les conditions d'adaptation optimum des cordes aux divers types d'instruments.

Nous avons précisé qu'un instrument de musique est fait pour être entendu: son anatomie et sa physiologie doivent donc correspondre à l'anatomie et à la physiologie de l'oreille.

Nous allons étudier maintenant comment l'instrument, considéré comme la somme d'une série de résonateurs couplés, déforme la vibration excitatrice pour aboutir au spectre global perçu.

I^a) L'INSTRUMENT, système complexe de résonateurs, défini par la courbe de réponse :

Enumérons les principaux résonateurs et précisons leurs caractéristiques :

a) Les cordes : Si on excite une corde, les cordes voisines entrent en vibration par sympathie; dans le violon les 4 cordes sont solidarisées par le chevalet. On vérifie (au microscope) que l'excitation sympathique est d'autant plus importante que deux sons primaires ont entre eux un grand nombre d'harmoniques communs. Les cordes du violon sont accordées à la quinte l'une de l'autre: les harmoniques communs sont nombreux (Fig. I7); si on considère par exemple les cordes SOL et RE, on voit qu'elles ont 9 harmoniques communs (pour les 30 premiers harmoniques du SOL) etc.

Les résonances sympathiques se produisent de la même manière entre vibrations longitudinales, torsionnelles et vibrations d'octave. Les cordes voisines déforment donc la vibration de façon sensible; on peut s'en rendre compte à l'audition directe: il suffit de jouer un SOL à vide de violon en laissant alternativement vibrer par sympathie les



cordes voisines ou en les étouffant: le timbre est modifié de façon sensible, ainsi d'ailleurs que le niveau, ce que confirment les spectrogrammes que nous avons enregistrés et dont nous reparlerons plus loin.

En d'autres termes, l'accord caractéristique d'un instrument à cordes conditionne partiellement son timbre (quinte pour le violon, l'alto et le violoncelle; quarte pour la contrebasse, quarts et tierce pour la guitare).

b) Bouts morts des cordes. Ce sont les parties de la corde qui se trouvent entre chevalet et cordier ou entre sillet et cheville. Etant donné leur faible longueur (4 à 7 cm), les vibrations longitudinales de ces bouts morts sortent de l'aire d'audibilité, mais leur fréquence transversale propre est excitée par sympathie chaque fois qu'elle correspond à un harmonique de l'excitation; on mesure la fréquence propre des bouts morts par simple excitation transversale à l'archet.

c) Le cordier. Celui-ci est maintenu d'une part par les extrémités des cordes, d'autre part par une attache en boyau fixée au bouton; sa fréquence propre est basse; pour la mettre en évidence, il suffit de frotter le cordier transversalement avec un archet; des écarts notables existent d'un instrument à l'autre.

d) La touche. Seule sa longueur est à peu près normalisée; ses épaisseurs varient d'un instrument à l'autre. La partie libre de la touche (non collée au manche) vibre comme une verge fixée à un bout; on peut facilement l'exciter par frottement à l'archet.

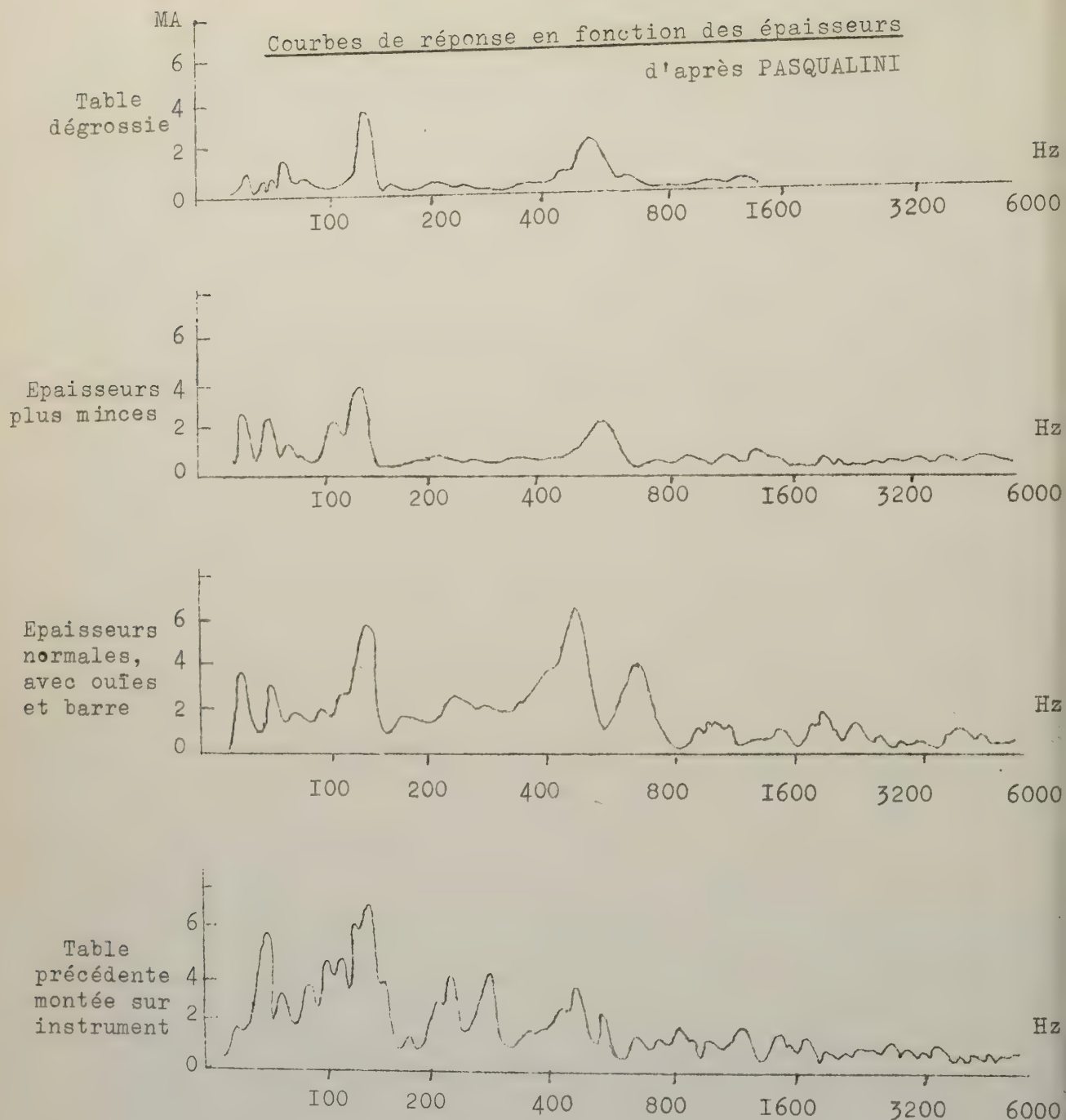
e) Les chevilles : Chaque cheville a une fréquence propre que l'on peut exciter également par frottement de l'archet.

f) La table : Nous avons montré précédemment qu'elle avait deux fréquences propres différentes à l'emplacement des deux pieds du chevalet en raison de la dissymétrie interne de l'instrument; l'intervalle entre les fréquences aux deux pieds est environ d'une octave (maximum). On excite ces deux fréquences à l'aide d'un dispositif électro-magnétique, électro-statique ou simplement à l'aide d'une tige de verre ($\varnothing = 5$ mm, longueur = 15 cm) que l'on frotte avec les doigts humectés d'eau acidulée.





FIG. 18



Les trois premières courbes de réponse montrent les modifications des points de résonance à divers stades de la fabrication d'une table; la dernière est celle de l'instrument complet muni de la table précédente.

L'expérience nous a montré un glissement graduel des pointes: vers le grave quand on amincit au centre de la table, vers l'aigu quand on amincit les bords.

g) Le fond: Contrairement à la table, il n'y a qu'un point d'excitation: la base de l'âme (celle-ci transmettant les vibrations transversales de la table); on relève la fréquence propre en ce point de la même manière que pour la table.

h) La cavité (formée par la caisse) peut être excitée par voie éolienne, en soufflant sur le bord de l'ouïe; sa fréquence propre est fonction du volume de la caisse et de la surface des ouvertures (ouïes ou FF). Savart avait mesuré ces fréquences pour des instruments de Stradivarius et trouvé (FETIS) 512 vibrations simples, soit 256 Hz. La caisse du violon est à peu près normalisée dans ses dimensions: la fréquence propre de la cavité varie peu; nos propres mesures de cette fréquence ont donné, pour 35 instruments, une moyenne de 250 Hz.

La simple énumération des résonateurs principaux dont chacun peut vibrer de plusieurs manières, les interactions multiples, la présence des harmoniques respectifs de chaque résonance fondamentale montrent l'extrême complexité de la courbe de réponse d'un instrument. Les variations des divers paramètres matériels de l'instrument déterminent la "personnalité" de chaque violon.

Pour déterminer cette courbe de réponse, certains expérimentateurs excitent le système de résonateurs par une source sinusoïdale de fréquence continuellement variable (ARNS; BLADIER 7; MEINEL I; PASQUALINI I et 2). Le propos de ces chercheurs était de trouver une méthode d'appréciation de la qualité des instruments. Mais les courbes de réponse ainsi relevées sont tellement complexes et sujettes à des fluctuations d'un instrument à l'autre qu'il est à peu près impossible de les dépouiller: on ne peut en tirer que des renseignements très généraux (Fig. I8).

Nous avons procédé d'une autre manière en relevant uniquement les fréquences fondamentales propres des principaux résonateurs; ainsi la courbe est très simplifiée et le rôle de chaque résonateur dans le spectre est nettement défini.

EXEMPLE (Fig. I9) : Pour un instrument classique les fréquences relevées par excitation directe étaient (dans l'ordre des fréquences) :

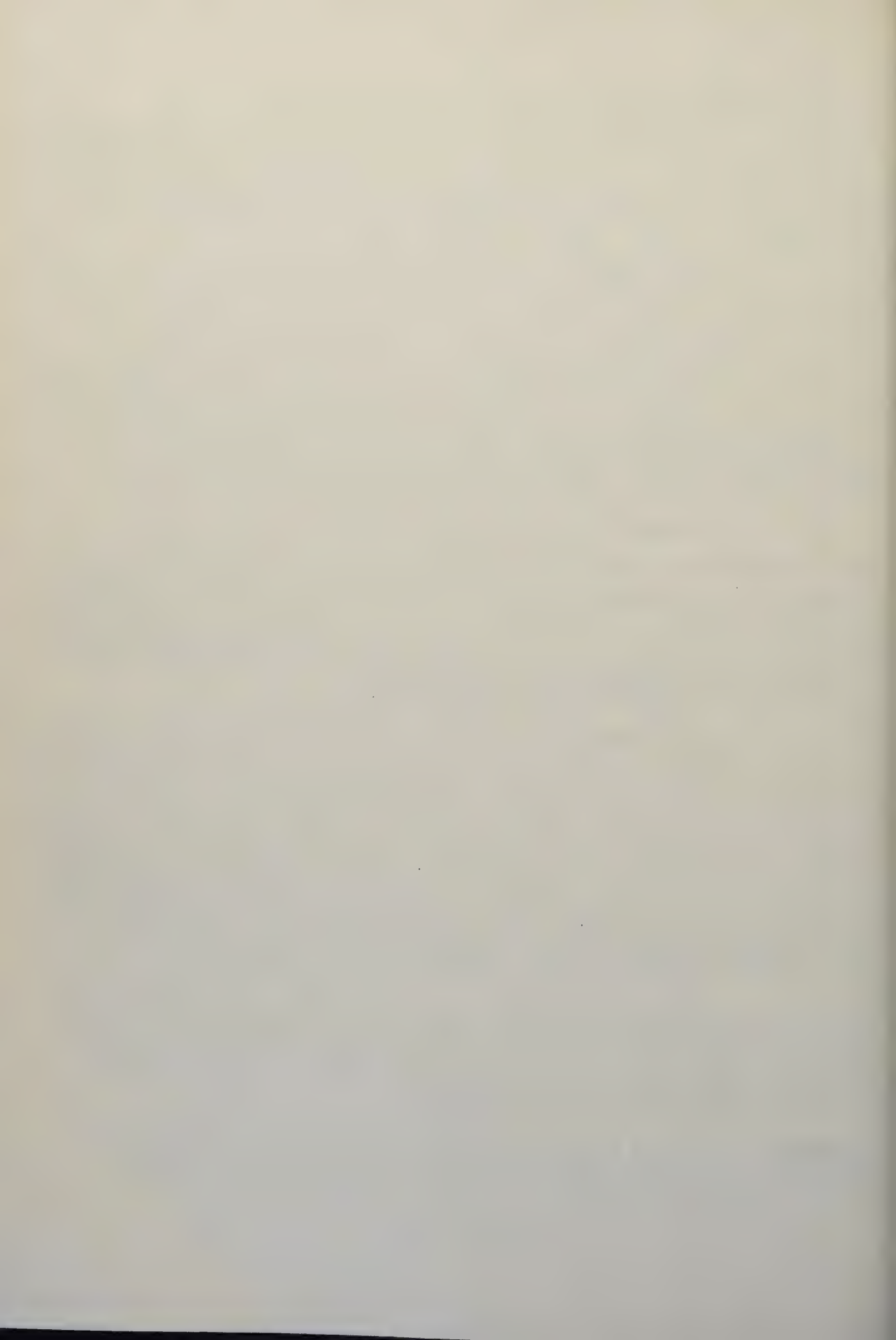
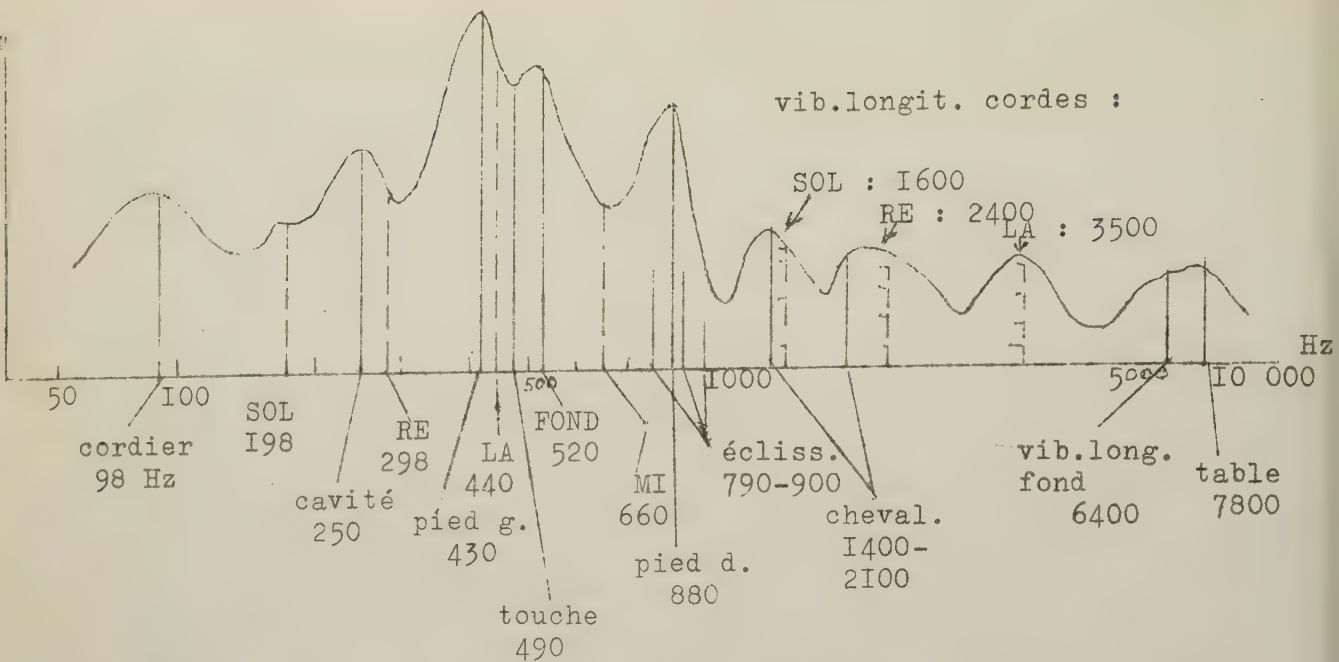
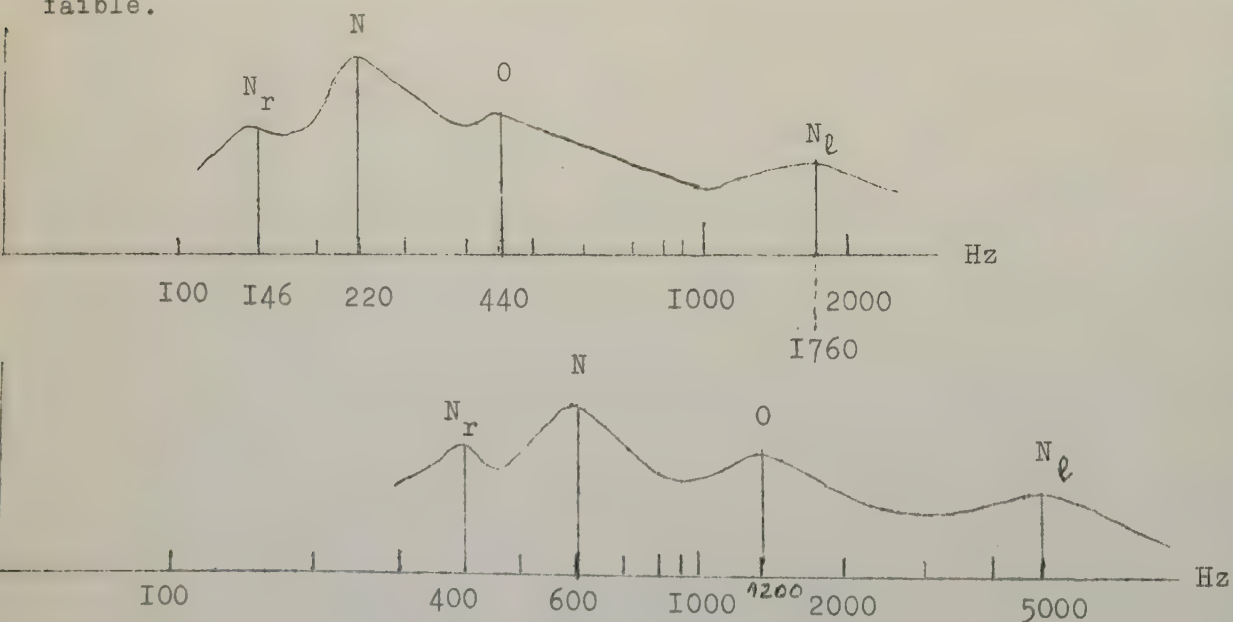


FIG. 19



Courbe de réponse schématique d'un instrument, établie en relevant les fréquences propres des résonateurs principaux; cette courbe varie avec chaque instrument: les fréquences des résonateurs élémentaires sont déterminées par le luthier; les pointes des résonances élémentaires sont d'autant plus aiguës que l'amortissement de chaque résonateur est plus faible.



2 exemples d'excitation schématisés (les fondamentaux seuls sont représentés) : N_r vib.torsion ; N : transversale ; O : octave ; N_l : longitudinale. Le spectre rayonné (résultat de la superposition courbe de réponse - excitation) change donc pour chaque note. Avec les harmoniques, les phénomènes deviennent extrêmement complexes.

Cordier : 98 Hz - Corde SOL : 198 Hz - Cavité : 250 Hz -
 Corde RE : 298 Hz - { Pied gauche chevalet : 430 Hz - Touche : 490 Hz -
 + Corde LA : 440 Hz
 Fond : 520 Hz - Corde MI : 660 Hz - Eclisses : 790 -830- 900 Hz -
 Pied droit chevalet : 880 Hz - Corde SOL (longitudinal) : 1400 Hz -
 Chevalet : 1600 Hz - Corde RE (longitudinal) : 2800 Hz -
 Corde LA (longitudinal) : 3200 Hz - Fond (longitudinal) : 6400 Hz -
 Corde MI (longitudinal) : 7100 Hz - Table (longitudinal) : 7800 Hz.

On porte en abscisse les fréquences ainsi déterminées. Pour les amplitudes, nous avons réalisé une échelle arbitraire de 1 à 5 dont les cotes sont fonction de l'importance pratique des divers détails (cette importance est bien connue empiriquement). Ainsi on peut réaliser une véritable synthèse de la courbe de réponse de l'instrument.

On observe que la plupart des résonateurs sont groupés dans la zone sensible de l'oreille et dans la tessiture de l'instrument (entre 200 et 2000 Hz). Le système est donc susceptible d'amplifier par résonance une gamme très étendue de sons et leurs harmoniques respectifs. L'amplification sera uniforme moyennant une judicieuse répartition des pointes de résonance ce qui constitue une part importante de l'art du luthier. Signalons que certaines pointes sont fluctuantes (Fig. 20).

22) L'EXCITATION :

Le spectre perçu est le résultat de la superposition de la courbe de réponse et de l'excitation: il reste donc à définir celle-ci.

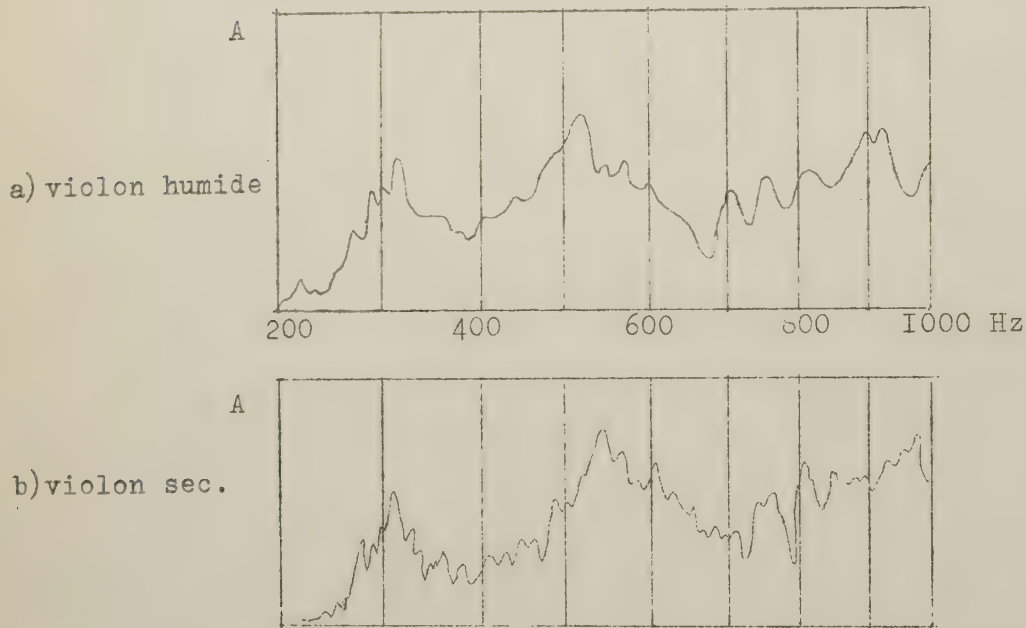
Nous avons vu que la force périodique fournie par le contact archet-corde avait l'aspect d'une oscillation de relaxation en dents de scie dont le spectre de Fourier bien connu est une représentation particulièrement simple et s'exprime par la loi en A/n (Fig. 20) - A est l'amplitude et n le numéro de l'harmonique considéré -. Le rôle de l'instrument considéré comme amplificateur passif est de modifier la répartition des harmoniques ainsi produits: il est donc normal de prendre cette courbe en A/n comme courbe de référence. Si la fréquence propre d'un des résonateurs coïncide avec le fondamental ou l'un des harmoniques de celui-ci, ce fondamental ou cet harmonique est amplifié par résonance et il se produit sur la courbe de référence une bosse. L'ensemble de ces bosses détermine la forme du spectre sonore réel qui sera rayonné par l'instrument; par analogie avec un concept très répandu en phonétique, nous appelons ces bosses les "formants". Nous distinguons alors les bosses situées au-dessus de la courbe de référence en A/n que nous appelons formants positifs et les trous, au-dessous de cette courbe, que nous appelons formants



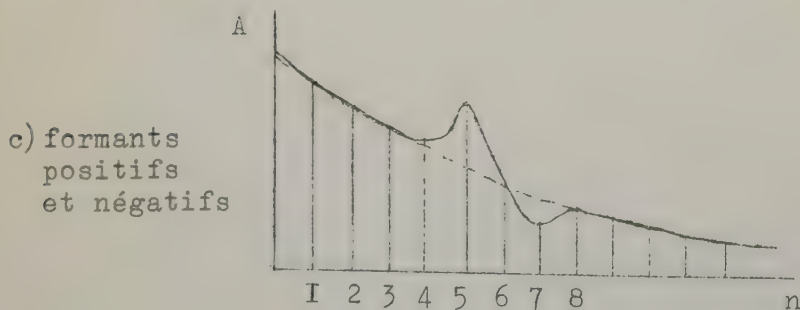


FIG. 20

Modification de la courbe de réponse d'un instrument en fonction de l'humidité (d'après ARNS 3)



La courbe de réponse d'un instrument est déterminée par le luthier. Cette courbe est fixe dans des conditions atmosphériques déterminées. Mais les bois sont hygroscopiques (nous avons mesuré des écarts de poids de l'ordre de 8 g pour un fond, entre 10 % et 100 % d'humidité). Les propriétés des bois varient donc en fonction de l'humidité. En particulier le coefficient d'amortissement augmente avec l'humidité: d'où aplatissement des pointes de résonance et disparition des pointes secondaires. Les relevés de ARNS montrent nettement la différence. Le son d'un violon change donc avec l'humidité.



négatifs (effet de filtre de rejet de certains paramètres; par exemple la place de l'archet sur la corde; nous y reviendrons plus loin).

L'excitation est déterminée par la corde. Représentons donc le fondamental transversal de la corde par la courbe de référence ci-dessus.

Nous savons qu'à la fréquence fondamentale définie par la courbe de référence se superposent les fréquences longitudinales, torsionnelles et la fréquence d'octave.

a) Vibration longitudinale : Nous avons vu que le paramètre sensible A détermine le numéro de l'harmonique du fondamental qui sera amplifié par la fréquence longitudinale. Si le paramètre A est un nombre entier, l'amplification sera maximum: le formant positif déterminé sur la courbe de résonance aura un relief maximum. Si on s'écarte de cette valeur juste (pour une corde entretenue), le relief du formant diminue; il est minimum pour des valeurs intermédiaires (8,5 - 9,5 par exemple). La fig. 2I montre le passage graduel de la valeur 8 à la valeur 9 du paramètre A: les oscillogrammes successifs ont été obtenus en variant graduellement la tension d'une corde boyau, c'est à dire la fréquence transversale, la fréquence longitudinale restant fixe.

b) Vibration d'octave : Les mêmes oscillogrammes comportent l'enregistrement simultané de la vibration d'octave. Celle-ci détermine sur la courbe de référence un formant positif sur l'harmonique 2 du transversal; les harmoniques propres de la vibration d'octave déterminent un formant positif sur tous les harmoniques pairs du transversal (Fig. 2I).

c) Vibration de torsion : Vibration transversale et vibration torsionnelle ont des harmoniques communs selon leur intervalle. Exemple: Si la note torsionnelle est une quinte en dessous du transversal, on aura les correspondances suivantes :

au 2 ^e	harmonique	du transversal	correspond	le 3 ^e	harmonique	du torsionnel
" 4 ^e	"	"	"	" 6 ^e	"	"
" 6 ^e	"	"	"	" 9 ^e	"	"

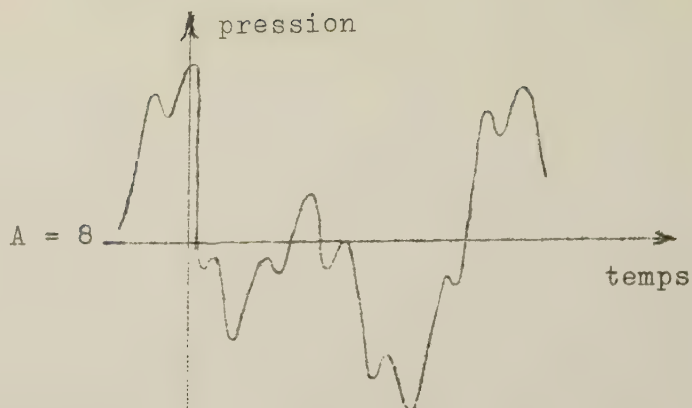
etc.

Ainsi les harmoniques 2, 4, 6 etc de la courbe de référence seront amplifiés. Il va sans dire que le groupe d'harmoniques amplifiés

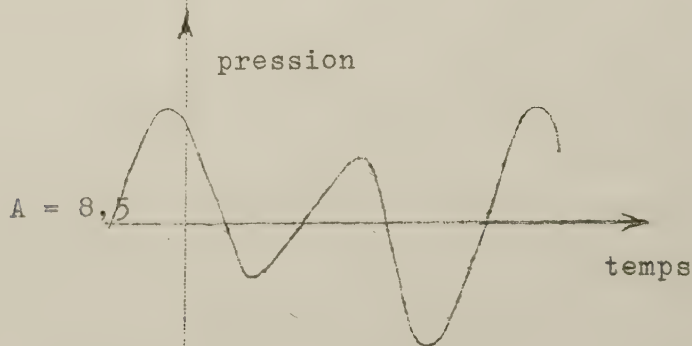


FIG. 2I

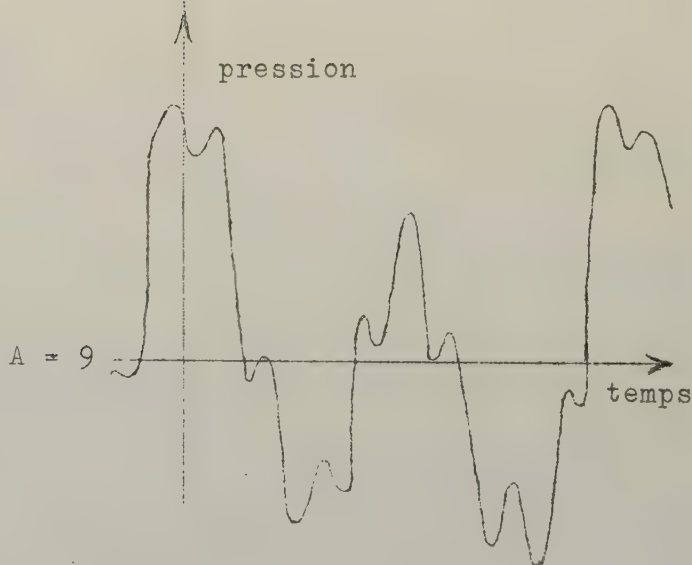
Paramètre sensible $A = 8$:
l'harmonique 8 et l'harmonique 2 (vibration d'octave)
sont mis en évidence par
l'oscillogramme.



$A = 8,5$
Seul l'harmonique 2
subsiste (plus de résonance
longitudinale).



$A = 9$
L'harmonique 9 et l'harmonique 2 coexistent.



N.B. Les modifications du paramètre A sont obtenues par modification de tension de la corde: la période fondamentale s'allonge au fur et à mesure que la fréquence transversale diminue.

par la fréquence torsionnelle est différent si l'intervalle est différent de la quinte; plus l'intervalle est numériquement simple, plus il y a de formants positifs sur la courbe de référence.

d) Formants négatifs : Il est connu que la place de l'archet sur la corde modifie le timbre; selon la pression de l'archet le point de contact corde-archet devient un noeud ou un ventre relatif, comme on a vu plus haut; on supprime de toute façon un certain nombre d'harmoniques du fondamental transversal ce qui conditionne un rejet, un trou, dans la courbe de référence. Ainsi la forme de l'excitation est déterminée par les paramètres sensibles de la corde et les conditions d'excitation (point de contact corde-archet). La forme vibratoire communiquée par la corde à l'instrument est donc singulièrement complexe et s'écarte sensiblement de la représentation simplifiée en dents de scie.

Cette courbe enveloppe de l'excitation se déplace continuellement sur l'échelle des fréquences pendant le jeu de l'instrument, puisque le jeu consiste précisément à modifier la fréquence fondamentale transversale. Par contre, la courbe de réponse est fixe (puisque'elle est déterminée par la structure de l'instrument).

Le spectre global rayonné par l'instrument est le résultat de la superposition de l'excitation à la courbe de réponse de l'instrument. La courbe de réponse étant plus ou moins irrégulière, il est évident que la courbe enveloppe du spectre final variera pour chaque note émise par l'instrument; c'est ce que nous avons vérifié sur un grand nombre d'enregistrements de spectres au sonagraphe.

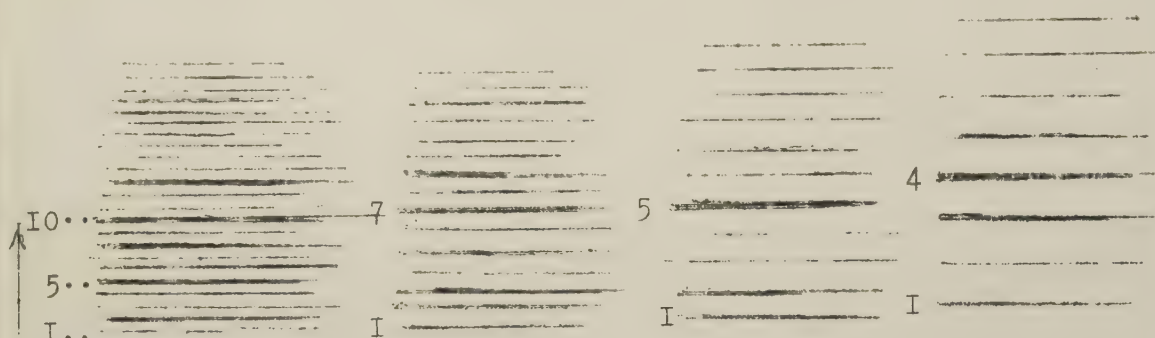
Si l'on se propose (comme c'est le cas dans un bon instrument de musique) d'avoir une certaine homogénéité de niveau entre les diverses notes qu'émet l'instrument, il est évident que l'ordonnancement des divers résonateurs élémentaires qui déterminent la courbe de réponse n'est pas indifférent. L'idéal serait d'avoir une série de résonateurs convenablement amortis et couvrant tout le domaine de fréquence de la tessiture de l'instrument (harmoniques audibles compris). C'est ce qui semble émerger des relevés de courbes de résonances de bons violons (MEINEL, PASQUALINI, ARNS, BLADIER). En définitive, c'est l'aspect ordre-désordre de la courbe de réponse qui détermine en grande partie la qualité d'un instrument -tout comme l'aspect ordre-désordre des paramètres sensibles des cordes détermine

Sonagramme d'un violon de GABRIELLY 1767

a)

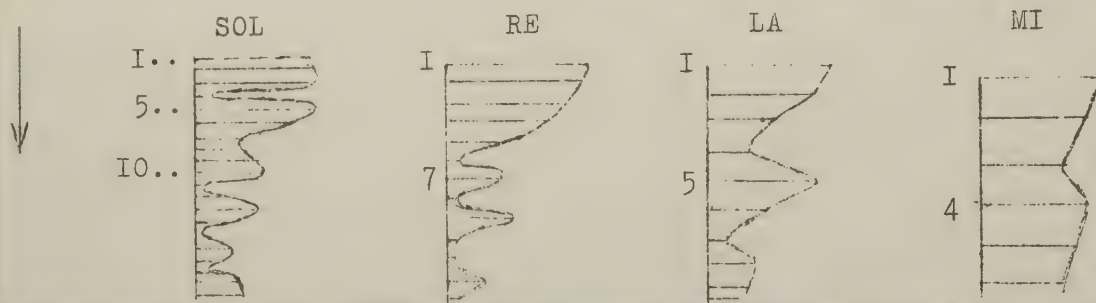


b)



rang harmonique

c)



Exemple de sonagramme. Le sonographe ou spectrographe acoustique donne l'évolution du spectre en fonction du temps; il permet de faire des relevés (sections) à tel ou tel instant de la durée d'exploration de 2,4 secondes. La figure représente un sonagramme des 4 cordes à vide d'un violon italien ancien. Le sonagramme comporte trois parties :

a) un relevé des niveaux. Malgré son imprécision, ce relevé est souvent suffisant pour des comparaisons;

b) l'enregistrement du sonagramme. Chaque note dure environ 1/2 seconde. Les harmoniques se lisent de bas en haut ; le noircissement des raies est fonction de l'intensité relative des harmoniques;

c) le spectre, Les harmoniques se lisent de haut en bas. L'échelle des amplitudes est logarithmique; les courbes enveloppe traduisent bien la réalité auditive.

FIG. 22

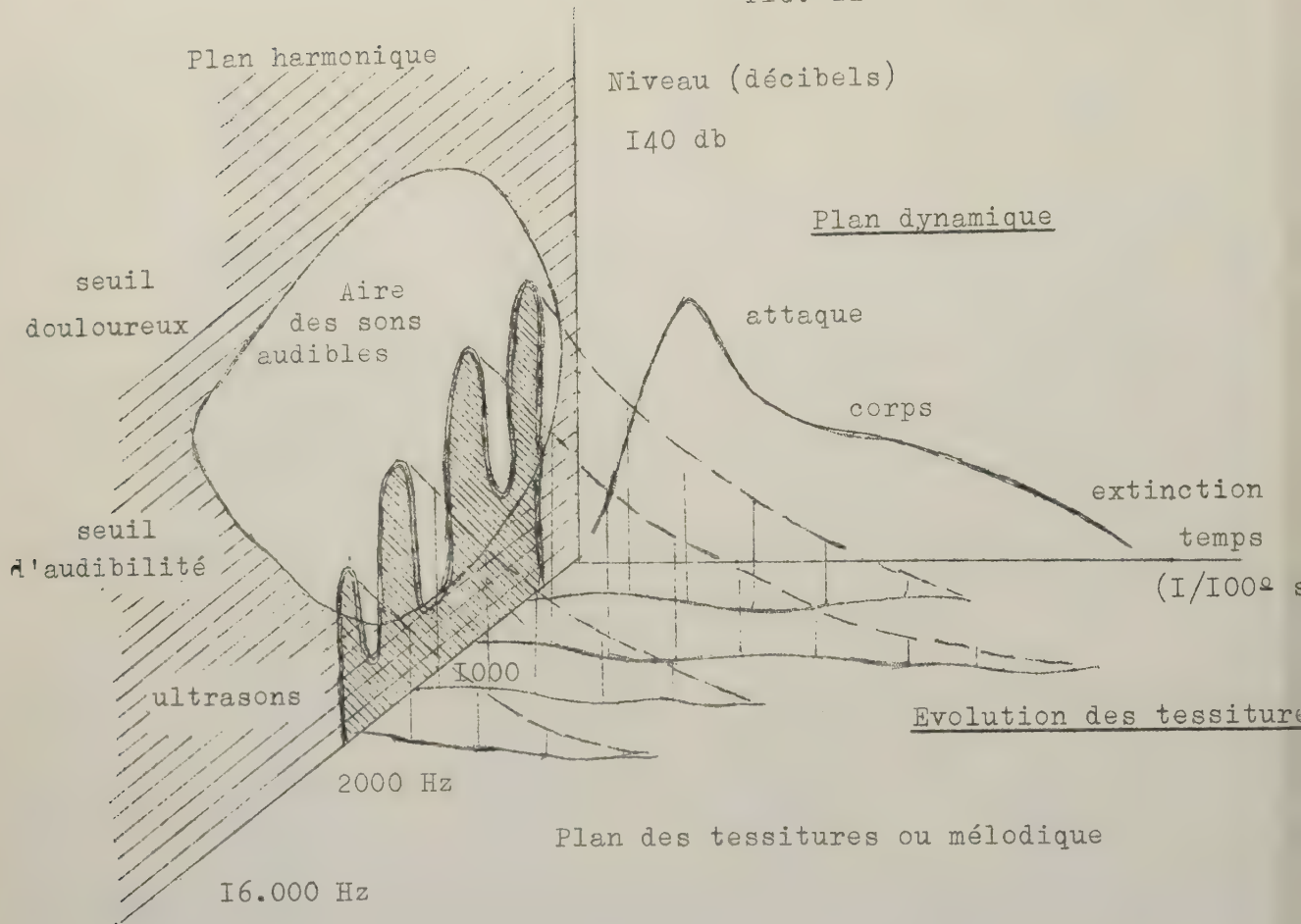


Diagramme tri-dimensionnel d'un son (niveau, hauteur, durée)
(d'après MOLES 2 et 3)

Le sonagraphe permet de faire des relevés (sections) à tel ou tel instant de la durée du son. Il donne un enregistrement (durée 2,4 secondes), une courbe de niveau et des spectres aux points choisis.

la qualité esthétique de l'excitation.

Cet aspect du problème de l'instrument de musique est confirmé par l'expérience courante en lutherie. On obtient un ordre dans un système si celui-ci est construit à partir d'un module. L'idée de comodulation était chère aux artistes et aux architectes de la Renaissance (époque de la création du violon). La géométrie du violon répond directement à cette idée. Les luthiers utilisent encore actuellement le pied et ses subdivisions; or les dimensions de l'instrument sont rigoureusement des subdivisions de cette unité de longueur :

longueur intérieure de la caisse (entre les tasseaux) 12 pouces.

Largeur du haut $12/2 = 6$ pouces;

largeur du milieu $12/3 = 4$ pouces;

largeur du bas = largeur du haut $\times 5/4 = 7,5$ pouces;

longueur des cordes = 12 pouces

etc. Les épaisseurs étaient établies en lignes ($1/12^e$ du pouce).

Ainsi existait une comodulation remarquable entre les diverses dimensions de l'instrument, c'est à dire, en définitive un ordre systématique entre les divers résonateurs élémentaires de l'instrument.

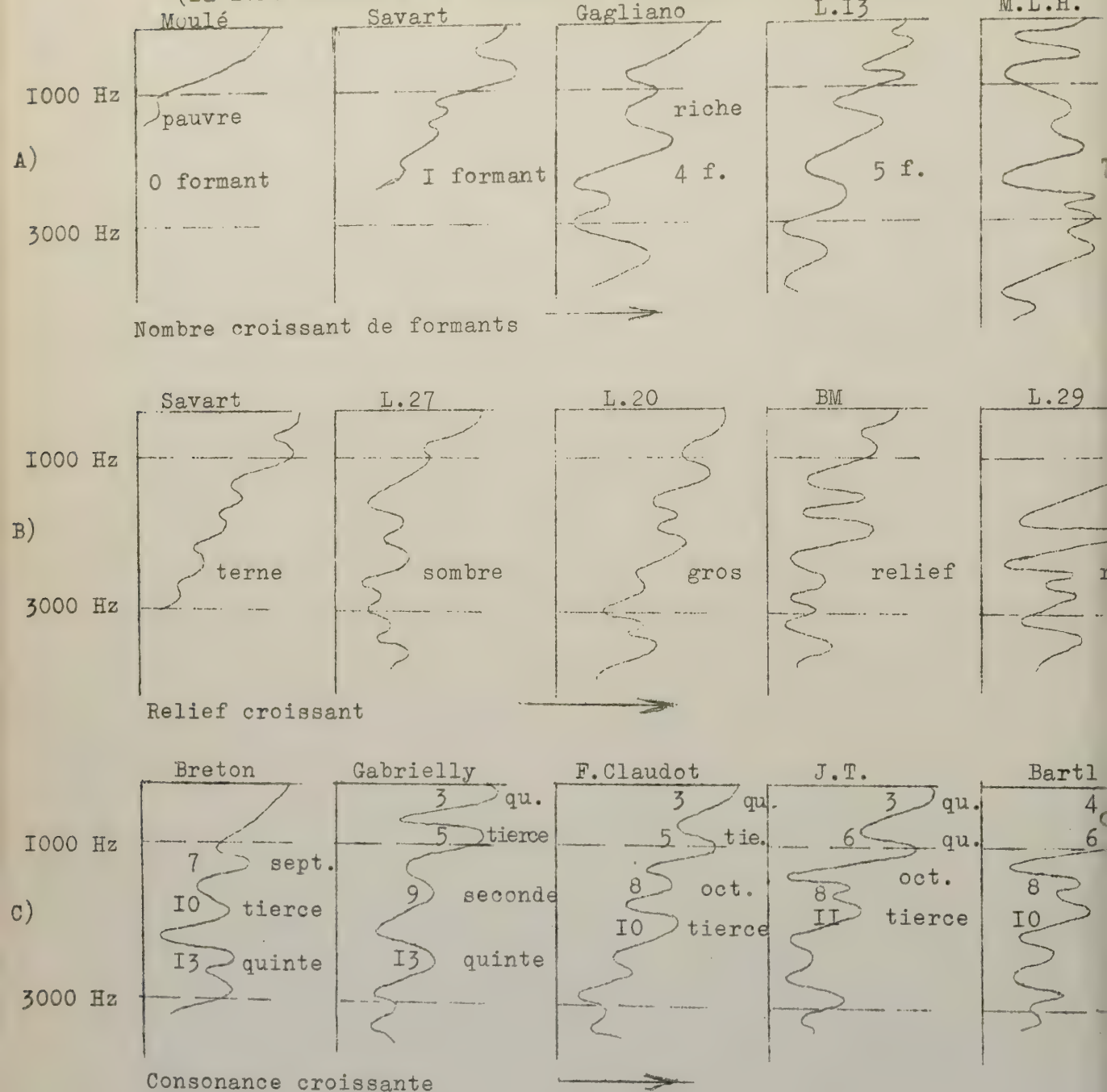
32) ETUDE EXPERIMENTALE DES SPECTRES RELEVES AU SONAGRAPHE :

On a montré que l'oreille effectue une intégration du spectre en explorant sa courbe enveloppe (POTTER, WINCKEL I). Il est donc indiqué d'utiliser des analyseurs qui permettent d'établir facilement cette enveloppe; c'est pourquoi nous avons utilisé le sonagraphe (LEIPP - MOLES).

A) LE SONAGRAPHE : Le sonagraphe ou spectrographe acoustique qui donne l'évolution du spectre en fonction du temps et qui permet de faire des relevés (sections) à tel ou tel instant de la durée d'exploration de 2,4 secondes, n'est pas un instrument de mesure; son imprécision n'est pas gênante ici car ce qui nous intéresse est de déterminer la forme du phénomène, c'est à dire le nombre, le niveau relatif et la situation des formants placés dans la gamme acoustique. En effet, c'est cette forme qui est directement perçue par l'oreille et qui joue son rôle dans l'appréciation des sons musicaux. Le sonagramme est en somme un diagramme tri-dimensionnel

FIG. 23

Dépouillement de spectrogrammes (sonagrammes)
(la zone sensible de l'oreille: 1000-3000 Hz est indiquée).



Trois séries d'instruments ont été classées par ordre:

- A) nombre croissant de formants: richesse du timbre;
- B) relief croissant des formants: "relief" du son;
- C) consonance croissante des harmoniques avec le fondamental=timbre allant du dissonant au consonant;

Ces caractères du timbre sont vérifiés subjectivement.

d'un son (Fig. 22) -MOLES 3-.

On peut admettre que l'analyse du spectre ne requiert pas une précision supérieure à l'ordre de grandeur des fluctuations qu'on peut normalement attendre d'un instrument ou d'une série d'instruments. C'est pourquoi le sonographe s'est révélé ici comme l'instrument essentiel. Il possède des particularités intéressantes :

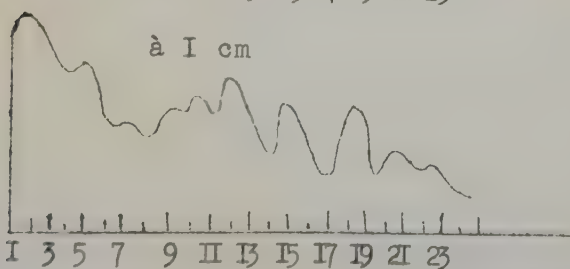
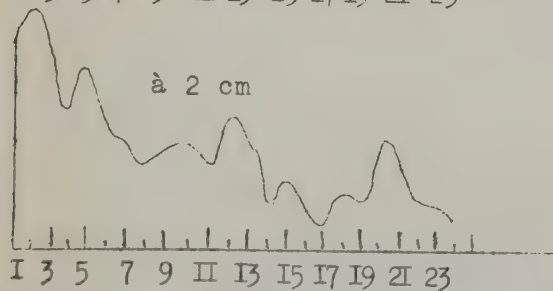
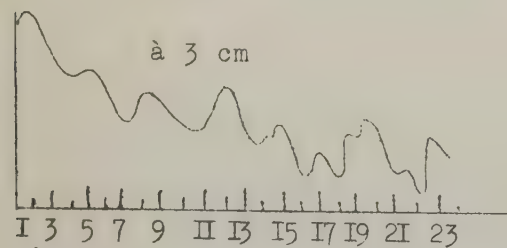
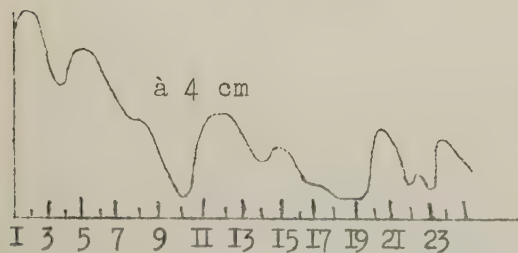
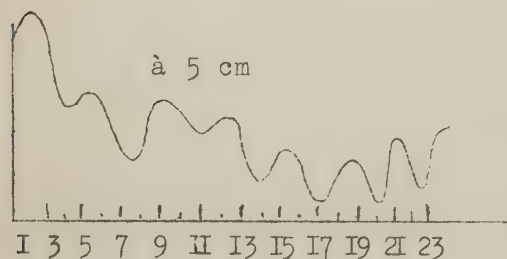
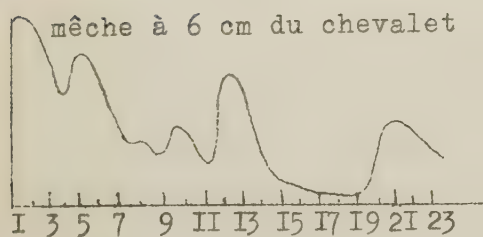
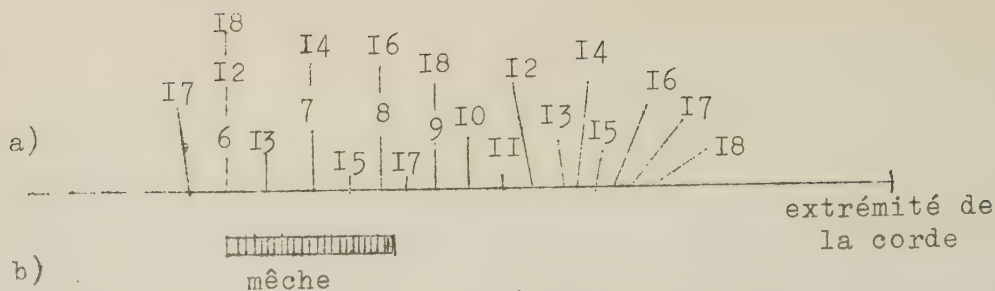
- il permet de relever sans difficulté des sons musicaux produits dans les conditions normales de jeu de l'instrument;
- sa gamme de sensibilité (250 à 8000 Hz) est suffisante puisqu'elle recouvre la partie essentielle de la gamme acoustique;
- la durée d'enregistrement (2,4 s) est suffisante pour permettre d'enregistrer et d'étudier plusieurs sons simultanément;
- l'échelle des sons est linéaire (équidistance des harmoniques) ce qui permet un dépouillement particulièrement aisé et rapide;
- l'échelle des amplitudes est logarithmique; l'enregistrement correspond ainsi à la réalité auditive;
- la durée des transitoires peut être évaluée avec une précision suffisante;
- l'appareil permet d'adjoindre au sonagramme une courbe de niveau, complétant ainsi la représentation tridimensionnelle du phénomène sonore.

B) TECHNIQUE DE DEPOUILLEMENT (Fig. 23) : Le spectre étant relevé, on trace sa courbe enveloppe que l'on recopie sur papier calque transparent; ainsi les comparaisons de spectres par simple superposition des calques deviennent aisées et font émerger d'emblée les ressemblances et les différences tant en niveau qu'en situation des formants.

On a établi des critères de dépouillement et leur correspondance avec la réalité auditive en corrélation avec les images que les musiciens emploient pour définir leur jugement subjectif:

a) Le nombre de formants d'un spectre : Il détermine la "richesse" du timbre ou sa pauvreté. Quand le nombre de formants est faible et le niveau moyen élevé, le son est "gros"; quand, dans le même cas, le niveau est faible, le son est "maigre". On voit (Fig. 23) une série d'instruments classés par ordre croissant de "richesse" de timbre.

FIG. 24



b) Le relief, c'est à dire l'amplitude d'un formant positif par rapport à celle de la courbe de référence en ce point. C'est ce que les musiciens appellent aussi le "relief du son". Ce relief détermine la personnalité du son; quand les formants sont aigus, c'est l'indice de coefficients d'amortissement faibles: les instruments ayant des spectres de ce genre "sonnent", c'est à dire présentent une courbe de décroissance du son de pente faible.

c) La situation des formants : Celle-ci est précisée par le rang de l'harmonique déterminant la pointe du formant (c'est l'harmonique qui émerge du formant et le caractérise). La situation détermine le degré de consonance ou de dissonance du formant, selon sa relation avec le fondamental transversal. Un formant sur l'harmonique 8 est consonant (octave); sur l'harmonique 6 on a la quinte; sur l'harmonique 7 le formant est dissonant (septième). De la situation du formant dépend le cachet esthétique du timbre. On voit (Fig. 23) des sons classés par ordre de consonance croissante.

C) LE JEU DE L'INSTRUMENT : Nous avons effectué une série d'expériences systématiques pour mettre en évidence les variations du spectre avec le jeu normal de l'instrument. Ces variations sont considérables et montrent que des comparaisons qualitatives entre instruments n'ont de valeur que si l'excitation est normalisée de façon stricte.

a) Place de l'archet (Fig. 24) : On a enregistré le spectre d'une note SOL à vide en écartant l'archet graduellement de 1 cm à 6 cm à partir du chevalet. Nous avons déjà signalé que la place de l'archet sur la corde détermine un noeud ou un ventre relatifs selon la pression de l'archet sur la corde. Dans le cas présent, la pression utilisée était faible: on élimine donc du spectre les harmoniques qui ont un noeud sous la mèche.

Mais une mèche d'archet normal a une largeur notable (1 cm); elle recouvre donc toute une série de points. Divisons une corde en I8, I7, I6 etc parties égales (la figure 24a représente l'extrémité de la corde vers le chevalet); en posant la mèche en un point donné, on élimine toute une série d'harmoniques (ici, les 6, I2, I8, I3, 7, I4, I5); si l'archet se déplace graduellement, le spectre présente des modifications

très complexes; c'est ce qui apparaît sur le spectrogramme. Les variations corrélatives du timbre sont bien connues subjectivement des violonistes et exploitées par eux pour introduire des nuances dans leur jeu.

Cet enregistrement montre accessoirement toute l'importance de l'excitation, indépendamment de l'instrument; il montre aussi la supériorité du violon sur d'autres instruments (effets sonores variables à l'infini avec des moyens simples).

b) Sens de l'archet (Fig. 25 a) : On a déjà montré que le spectre d'une note de violon subissait des modifications considérables quand on change le sens de défilement de l'archet (MOLES 34/I); on a ici l'explication de ce phénomène: nous avons vu que le fuseau vibratoire de la corde excitée par l'archet était dissymétrique; le sens de l'archet détermine une composante dirigée dans le sens de l'archet. Or la résultante de cette composante avec la composante perpendiculaire à la table donne une résultante qui s'appuie tantôt sur le pied droit du chevalet (f 1), tantôt sur le pied gauche (f 2) selon le sens de l'archet. Comme on a vu précédemment que les propriétés du pied gauche étaient différentes de celles du pied droit, il est normal que l'on trouve, en dehors de l'inversion de 180 de l'oscillogramme, une modification corrélative du spectre. C'est ce que le spectrogramme met en évidence.

c) Cordes voisines libres ou étouffées. Le spectrogramme (Fig. 25 b) justifie ce que nous avons dit sur ce point plus haut. On peut ajouter l'observation suivante : les cordes ne sont jamais rigoureusement accordées à la quinte; les résonances avec les cordes voisines sont donc accompagnées de battements et d'interférences; dans ces conditions le niveau peut être plus faible quand les cordes voisines vibrent par sympathie que lorsque ces cordes voisines sont étouffées; on peut facilement montrer ce phénomène à l'audition directe; les instrumentistes savent bien qu'un instrument mal accordé "sonne" mal.

d) Notes successives sur une même corde : Ce sonagramme (Fig. 25 c) montre qu'effectivement le spectre est tout à fait différent d'une note à l'autre et justifie ce que nous avons établi précédemment au sujet de la superposition de l'excitation et de la courbe de réponse d'un instrument.

FIG. 25

Variations du spectre avec la technique de jeu.

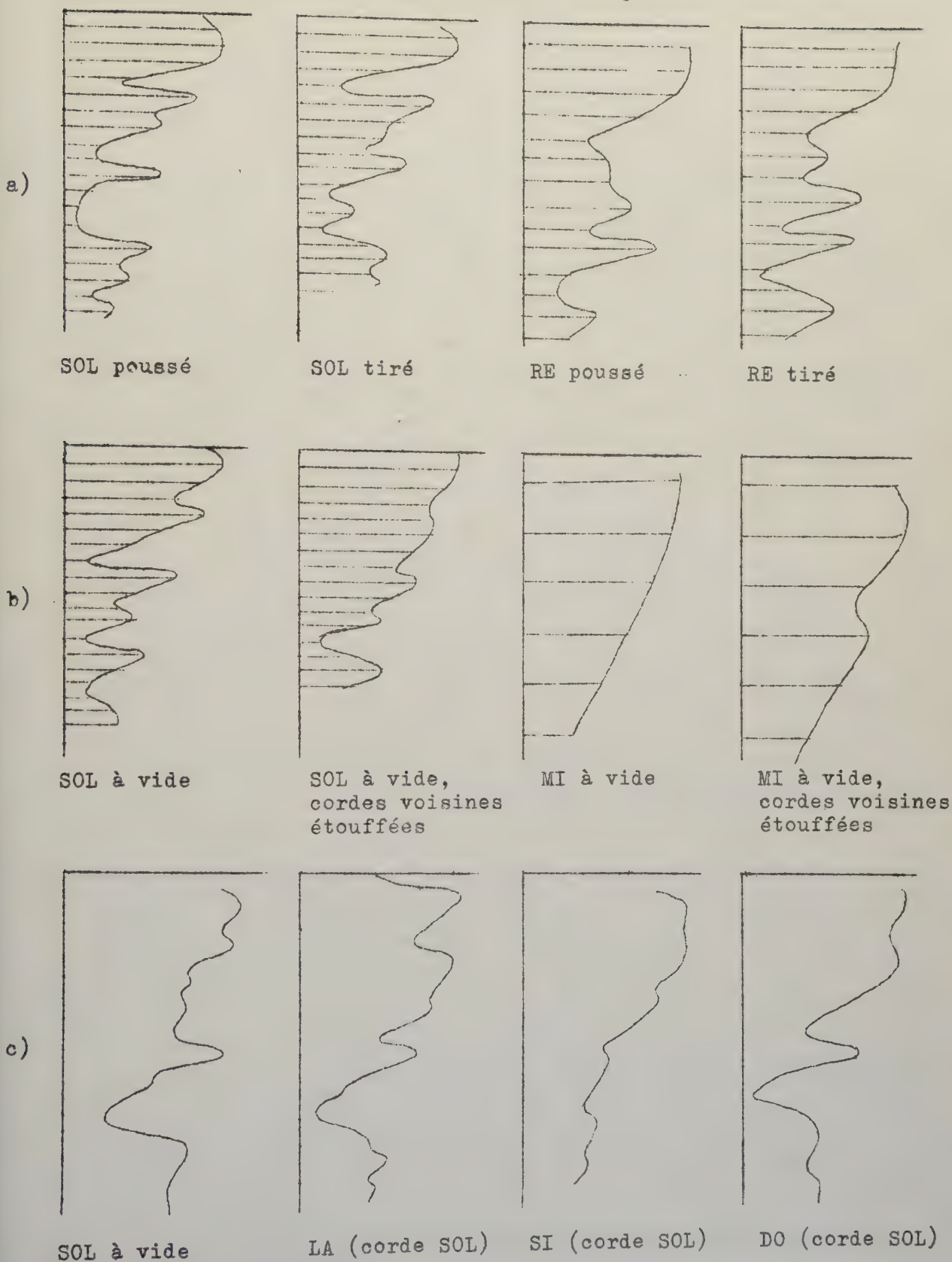
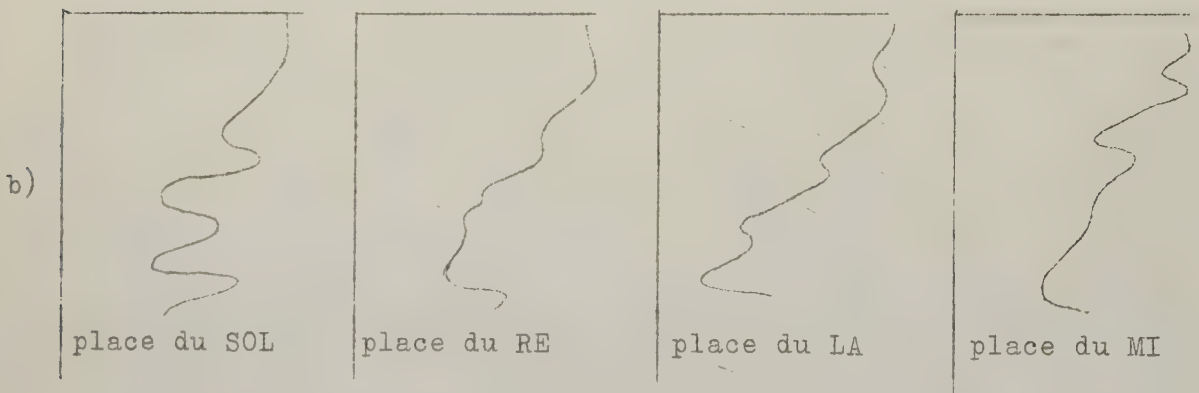
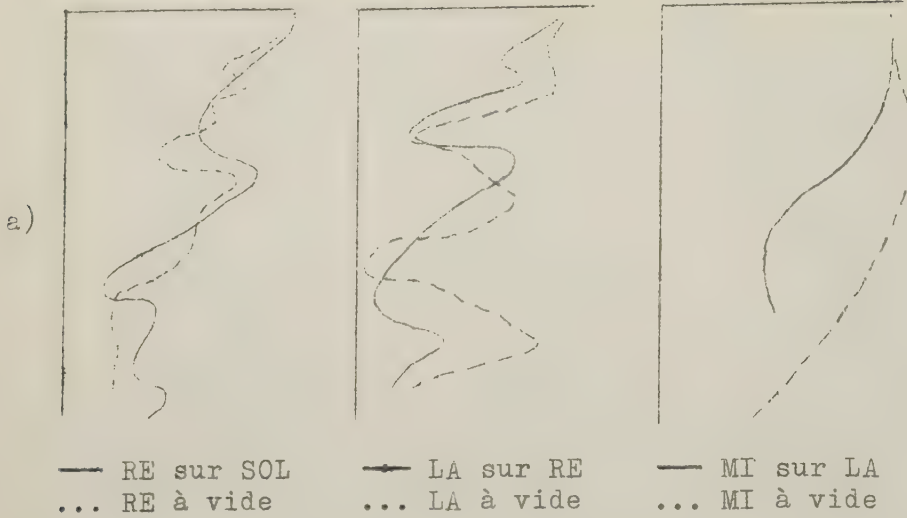
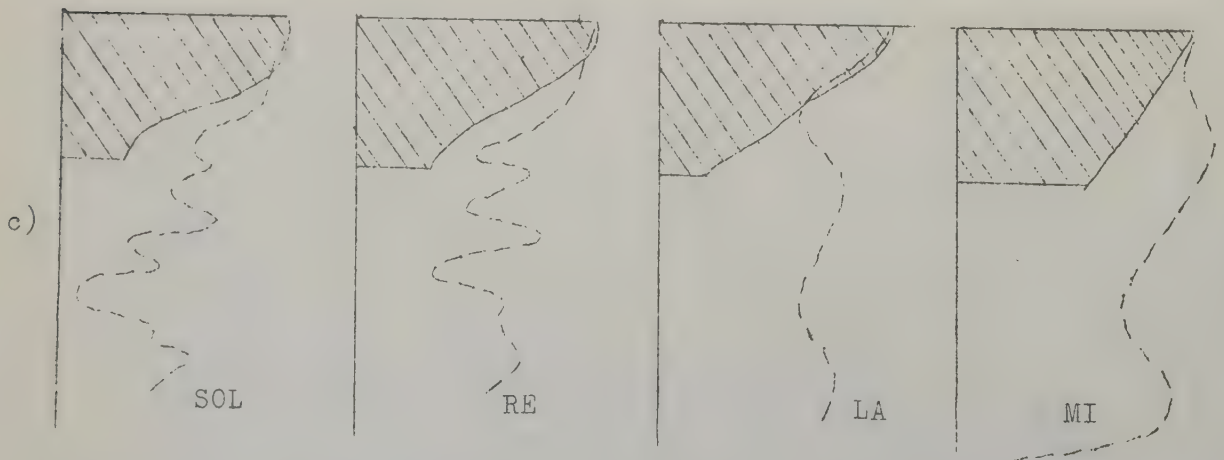


FIG. 26

Variations spectrales avec la technique de jeu.



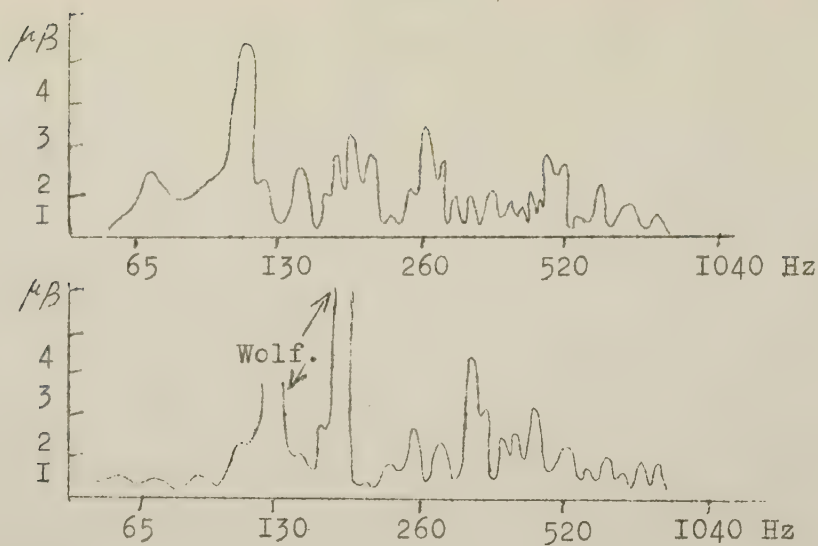
4 cordes SOL identiques montées sur un instrument; le spectre varie avec la place sur le chevalet.



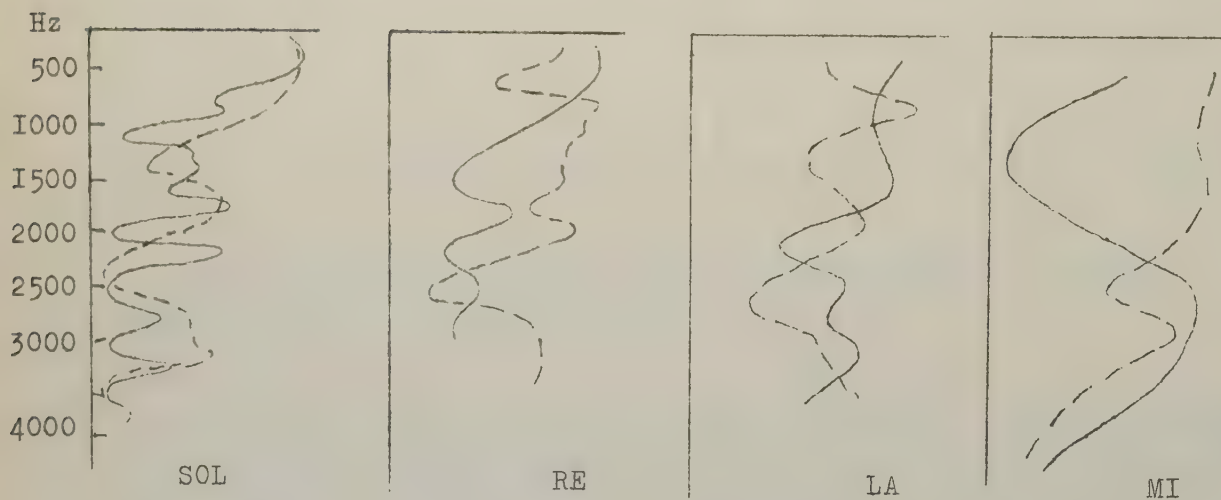
trait plein: avec sourdine ; pointillé: sans sourdine.

La sourdine est un filtre passe bas; elle modifie timbre et niveau.

FIG. 27



Courbes de réponse d'un violon avec son âme (en haut) et sans âme (en bas), d'après MEINEL. Les propriétés de la caisse sont totalement modifiées.



Sonogrammes des cordes à vide d'un violon:
 en trait plein: l'instrument avec âme,
 en pointillé: l'instrument sans âme.
 Les spectres sont profondément modifiés.

e) Même note émise sur deux cordes voisines : Ce sonagramme (Fig. 26 a) montre le rôle de la place de la corde sur le chevalet (utilisation différente des deux pieds du chevalet).

f) 4 cordes identiques montées sur le même instrument (Fig. 26b) On a sélectionné 4 cordes absolument identiques pour mettre en évidence de façon encore plus nette la différence de propriétés des deux pieds du chevalet; on voit que les spectres sont effectivement tout à fait différents, ce qui justifie ce que nous avons dit sur la dissymétrie de l'instrument.

g) La sourdine (Fig. 26 c) : On sait qu'elle diminue le niveau par son inertie. Mais nous avons remarqué aussi une différence de timbre. Cette différence s'explique par une modification des conditions aux extrémités. Le sonagramme (Fig. 26 c) montre que la sourdine joue le rôle d'un filtre passe-bas; on coupe ainsi toute la partie élevée du spectre provoquant par là un appauvrissement du timbre (suppression des formants élevés et corrélativement une baisse de niveau (cette baisse n'est donc pas provoquée par la diminution du niveau des harmoniques de rang inférieur comme on l'a cru jusqu'ici)).

Ainsi le sonagraphe permet d'étudier systématiquement les variations spectrales résultant des modifications de l'excitation (jeu de l'instrument).

D) LUTHERIE EXPERIMENTALE :

a) Chevalet : Les découpures du chevalet jouent un rôle notable dans le timbre de l'instrument; ce fait est bien connu empiriquement de luthiers. Nous avons systématisé l'expérience: on pose sur l'instrument un chevalet en bois plein et on relève le spectre des 4 cordes; puis on découpe successivement les pieds, les découpures latérales, puis le coeur du chevalet; en dernier lieu on isole les cordes MI et LA des cordes RE et SOL par une découpe supplémentaire. Les sonagrammes confirment les observations empiriques des luthiers: timbre et niveau se modifient; le meilleur rendement (homogénéité de niveau en particulier) est obtenu avec la forme classique.

b) Ame (Fig. 27) : Si on enlève l'âme d'un violon, on modifie totalement le fonctionnement de celui-ci; nous avons vu plus haut que les

Appareils
utilisés

utilisées

		P A R A M E T R E S	Coef- fi- cient	N. de points	Som- me
Enregistreur de niveau	{	I Niveau moyen	4	4	16
		2 Homogénéité de niveau	3	3	9
Sonographe	{				
		3 Richesse du timbre (n. de formants)	4	4	16
		4 Relief des formants	3	2	6
		5 Consonance des formants	3	4	12
Caméra à déroulement continu	{				
		6 Durée du transitoire d'attaque	2	3	6
		7 Durée du transitoire d'extinction	1	3	3
<u>Total sur 100</u>					68 ====

MODELE DE FICHE CARACTERISTIQUE POUR VIOLONS

L'importance numérique des coefficients varie avec le type d'instrument et, à l'intérieur d'un type, avec les conditions d'utilisation (musique de soliste, musique de chambre, musique microphonique etc). La fiche caractéristique donne un portrait physique global et simplifié de la qualité fonctionnelle d'un instrument; elle permet de porter un jugement objectif sur un instrument et de réaliser éventuellement un classement.

propriétés des deux pieds du chevalet en sont fortement modifiées; la partie sensible du spectre est située aux environs de 2700 Hz; l'âme détermine ici un formant positif important (le son est plus clair avec l'âme). Les harmoniques inférieurs ont un niveau plus élevé quand il n'y a pas d'âme (timbre plus grave, plus sourd). Le timbre est beaucoup plus "riche" avec l'âme pour les cordes graves (corde SOL: 3 formants sans âme; 8 formants avec l'âme).

4^a) L'APPRECIATION DE LA QUALITE D'UN INSTRUMENT DE MUSIQUE :

Cette appréciation est restée jusqu'alors du domaine subjectif. La méthode utilisée (comparaisons par paires, concours de sonorité) présente de nombreux inconvénients (introduction de l'équation personnelle des auditeurs, influence de la salle, des conditions hygrométriques, de la fatigue et enfin absence de document).

Les concours de sonorité ont pour ces diverses raisons montré la faillite du jugement subjectif (CHENANTAIS). Une méthode objective est nécessaire pour définir d'abord ce qu'il faut entendre par un "bon" instrument; elle permet également d'élaborer des techniques de contrôle pour la fabrication des instruments traditionnels et d'améliorer cette fabrication, éventuellement d'étudier rationnellement des prototypes d'instruments nouveaux (LEIPP - MOLES I et 2).

Ces considérations nous ont amené à l'élaboration d'une fiche caractéristique d'instrument de musique, basée sur la doctrine précédente. Cette fiche est établie à partir d'enregistrements et des mesures en laboratoire; elle suppose l'utilisation d'un enregistreur de niveau, d'un analyseur (type sonagraphe) et d'un enregistreur de transitoires (caméra à déroulement continu).

En effet, 3 problèmes distincts se posent :

a) le problème du niveau : Le bathymètre logarithmique résoud élégamment le problème de mesure du niveau: mesure du niveau moyen dans les conditions d'utilisation et mesure de l'homogénéité (égalité de niveau entre les diverses notes d'un même instrument). Une normalisation stricte des conditions de prise de son et d'excitation est indispensable, comme il a été précisé ailleurs.

b) Problème du timbre : La corrélation étroite entre le jugement subjectif et la forme de la courbe enveloppe étant connue, la fiche caractéristique comporte, pour le violon, un enregistrement des 4 cordes à vide (l'expérience a montré que ces quatre notes étaient suffisantes pour caractériser un violon). Chaque note est définie par la forme de la courbe enveloppe de son spectre; on attribue à chaque corde une note chiffrée pour sa richesse de timbre (nombre de formants), son relief et la consonance de son timbre. Ainsi dispose-t-on d'éléments métrologiques du timbre.

c) Problème des transitoires : La durée de ceux-ci est facilement mesurée grâce à la caméra à déroulement continu; une normalisation très stricte des conditions d'excitation est nécessaire, car les transitoires varient dans une large mesure avec les conditions d'attaque d'une corde.

La fiche caractéristique permet donc d'émettre un avis motivé sur la qualité d'un instrument; elle sera accompagnée d'un magnétogramme; on peut ainsi classer des séries d'instruments et le classement correspond à la réalité auditive pour tous les instruments que nous avons étudiés. Cette méthode est susceptible d'être étendue à d'autres instruments de musique.

5^a) EXTENSION AUX AUTRES INSTRUMENTS DE MUSIQUE :

La doctrine élaborée ici qui repose sur l'existence de différents modes de vibration des cordes, les relations harmoniques entre les spectres résultant de ces divers modes vibratoires, l'amplification de ceux-ci par des dispositifs mécaniques et par une série de résonateurs constituée par l'instrument, la normalisation de leur valeur, peuvent être étendus aux différents instruments de musique. Ainsi l'étude de tout instrument de musique comporte divers points :

a) L'étude de l'excitation : Dans les instruments traditionnels, les phénomènes sont complexes: on trouve à peu près constamment la coexistence de plusieurs modes vibratoires, déterminés par le mode d'excitation et les paramètres physiques des organes en cause; la notion de paramètres sensibles est générale: ce sont eux qui déterminent partiellement le spectre.

b) Le système de résonateurs : Celui-ci détermine la courbe de réponse du corps de l'instrument; cette courbe est toujours complexe; elle est fonction des coefficients d'amortissement des matériaux utilisés et des fréquences propres de chaque partie de l'instrument. Le nombre de résonateurs étant limité, les diverses notes d'un instrument ont, en régime permanent, des spectres différents.

c) Le système d'amplification mécanique : Il est déterminé par la structure de l'instrument; celle-ci conditionne l'amplification relative des divers modes vibratoires. D'une manière générale, un système considéré comme bon en lutherie est celui qui transforme au mieux l'énergie mécanique fournie par la force d'excitation en énergie acoustique, et concentre celle-ci dans la zone sensible de l'oreille.

d) La répartition des forces : Un instrument n'est viable que dans la mesure où il ne se déforme pas trop rapidement; d'où la nécessité d'une étude des matériaux et des formes les plus appropriées.

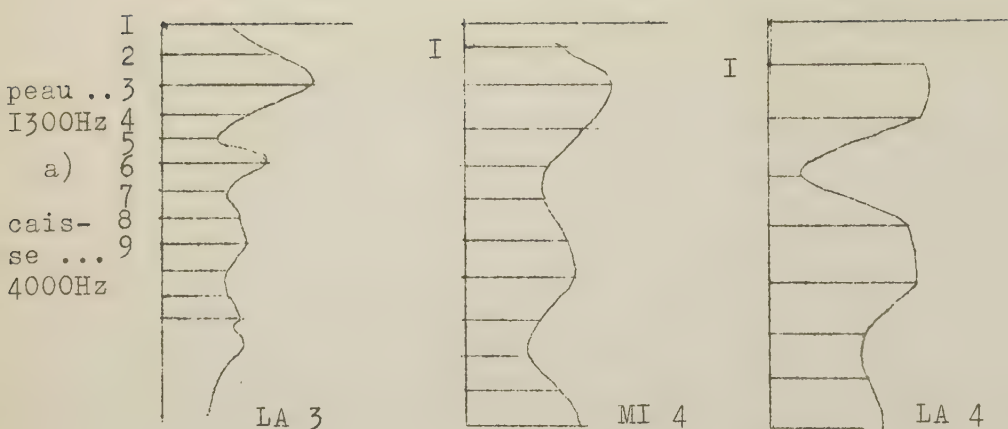
62) EXEMPLES D'INSTRUMENTS DE DIVERS TYPES :

a) Le violon de SAVART : Le physicien SAVART (1791-1841) fit un grand nombre d'études expérimentales sur les instruments à cordes frottées et publia un "Mémoire sur la construction des instruments à cordes et à archet" présenté à l'Académie des Sciences et des Beaux Arts en même temps que son violon trapézoïdal. Savart précise dans son mémoire que son propos n'était pas de créer un instrument entièrement nouveau, dont il faudrait étudier le jeu; il voulait réaliser un instrument facile à construire tout en conservant les organes essentiels du violon.

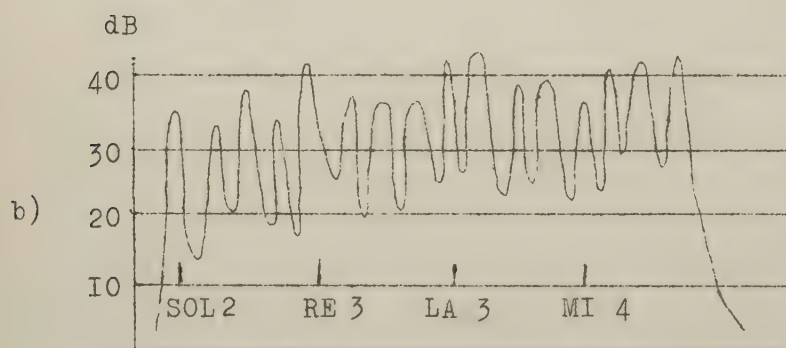
Il réalisa donc un violon dont la caisse était en forme de trapèze. Les tables étaient plates (sans voûte), les ouïes droites et la barre était collée sur la médiane longitudinale de la table. La commission chargée d'examiner cet instrument déclara: "L'opinion unanime a été que le nouveau violon pouvait passer pour excellent"; on avait comparé l'instrument avec des violons classiques à l'abri de la vue.

Nous avons étudié un instrument fabriqué par Savart qui nous a été prêté par MM. MILLANT, luthiers. On a comparé les résultats avec ceux d'un bon violon normal.

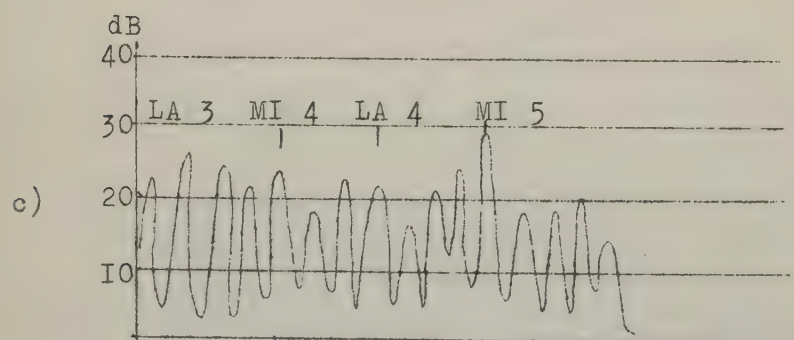
FIG. 28



Spectrogramme de 3 notes du gusla; le niveau du fondamental est faible.



Relevé du niveau d'une gamme diatonique sur violon normal (niveau moyen: 35 dB).



Relevé d'une gamme diatonique sur gusla (niveau moyen: 25 dB).

1^a) Niveau : On a enregistré au bathymètre logarithmique les niveaux des diverses notes données par l'instrument dans les conditions normales de jeu. Le niveau moyen est voisin de 30 dB (40 pour l'instrument normal). Les notes aiguës présentent un écart de 10 dB avec les notes graves, et l'instrument n'est pas homogène comparative-ment à l'instrument étalon.

2^a) Spectres (voir Fig. 23) : Le spectre du violon de Savart comporte 13 harmoniques notables sur la corde SOL (23 pour l'étalon): le timbre est moins riche (3 formants pour l'instrument de Savart, 7 pour l'instrument normal). Un seul formant du Savart émerge nettement (peu de relief). Ce formant est placé sur l'harmonique 6 (quinte): donc le timbre est consonant.

Conclusion : Le rendement du violon de Savart est sensiblement inférieur à celui du violon normal ce qui tient à diverses particularités : absence de voûtes (d'où déformation plus rapide de l'instrument et perte de niveau pour les notes graves), symétrie de la caisse, la barre étant collée sur l'axe longitudinal de la table. Les deux pieds du chevalet ont des propriétés identiques, d'où déséquilibre entre les notes graves et les notes aiguës.

Les essais de Savart démontrent donc par une voie expérimentale le bien-fondé de la forme et de la structure classiques du violon.

b) Le Gusla : Cet instrument primitif dont un exemplaire nous a été prêté par M. BUSNEL est intéressant à cause de sa simplicité. Il comporte une petite caisse monobloc de forme ovoïde (8 cm x 10 cm). Cette caisse est recouverte d'une peau de mouton sur laquelle vient s'appuyer un petit chevalet maintenu par la corde unique; celle-ci est constituée par une mèche de crin tendue par une cheville. L'archet est monté également avec une mèche de crin. C'est l'instrument à archet le plus simple qu'on puisse imaginer. Les dimensions étant très petites, les vibrations longitudinales sortent de l'aire d'audibilité et on peut les négliger et ne considérer que les vibrations transversales. Les fréquences de résonance de la caisse sont :

peau : 1300 Hz ; vibration de la caisse : 4000 Hz. Paramètre sensible A de la corde 5,8. La corde est accordée au LA 3 (440 Hz). La courbe de



réponse du système est donc de forme simple et comporte deux formants principaux. Si on excite le système à la fréquence 440 Hz, le paramètre sensible de la corde conditionne un troisième formant, vers 2600 Hz; le spectre théorique est donc facile à représenter schématiquement; il coïncide exactement avec le relevé au sonographe que nous en avons fait (Fig. 28). Si au lieu d'exciter l'instrument en jouant la corde à vide, on lui fait donner la note MI 660 Hz, la fréquence longitudinale de la corde devient 3900 Hz: elle coïncide à peu près avec la fréquence de la caisse (4000) et produit sur le formant de la caisse une surrésonance; le spectre est encore plus simple: il ne comporte plus que 2 formants (Fig. 28 a) ce que le sonogramme vérifie.

c) Problème général : L'instrument de musique est un cas particulier du problème général de la vibration des corps solides. Si on tend 4 cordes de violon sur un objet quelconque, le rendement est mauvais quantitativement et le timbre est désagréable, car à l'organisation interne d'un objet, à sa structure physique, correspondent l'organisation interne et la structure du signal musical qu'il émet. A l'antinomie ordre-désordre correspond l'antinomie musique-bruit.

-o-o-

RESUME DU CHAPITRE V

Nous avons montré que :

1) Le spectre d'un instrument de musique est le résultat de la superposition de la courbe de réponse du système de résonateurs couplés qui constituent l'instrument de musique et du spectre de l'excitation rendu complexe par la coexistence des divers modes vibratoires élémentaires de la corde excitée à l'archet.

2) Le sonographe, conjointement avec l'enregistreur logarithmique de niveau et la caméra à déroulement continu sont les outils de base permettant d'entreprendre dans de bonnes conditions l'étude du signal musical en relation avec les paramètres sensibles et la technique de jeu des instruments.

3) La doctrine élaborée permet d'établir une méthode objective d'appréciation de la qualité des instruments de musique; celle-ci est basée sur des enregistrements et des mesures: ces documents permettent de classer des séries d'instruments.



CHAPITRE VI.1

CRITIQUE DES RESULTATS PRECEDENTS - CONCLUSIONS

-o-

1°) CRITIQUE :

L'objet de ce travail a été de faire émerger à travers l'étude approfondie d'un instrument à cordes qu'il est légitime de considérer comme l'aboutissement d'une très longue évolution, les propriétés générales de cette classe d'instruments et d'y discerner une théorie physique de la lutherie.

Nous avons vu qu'il était impossible de porter un jugement objectif sur un instrument sans tenir compte des propriétés du récepteur auditif, de l'oreille, dont les caractéristiques jouent un rôle essentiel, en particulier la variation de sa sensibilité avec la fréquence et la notion de zone sensible qui déterminent l'appréciation auditive.

Les instruments de musique sont faits pour être entendus; la "physique" des instruments de musique est insuffisante pour rendre compte de la réalité auditive: ainsi s'expliquent les malentendus qui se sont perpétués entre physiciens et musiciens tant que les propriétés de l'oreille n'ont pas été définies avec assez de précision. Voici quelques exemples types à cet égard :

a) SEASHORE a établi le pourcentage d'énergie des divers harmoniques d'un violon (note SOL 2: corde à vide). Il trouve pour le fondamental un pourcentage égal à 0,1 ce qui correspond à un pourcentage de sensation nul. Comment, dans ces conditions peut-on expliquer la sensation de fondamental ? On a tenté de l'expliquer par l'apparition de différentiels au niveau de la membrane basilaire provenant de la non-linéarité de l'oreille; mais ces phénomènes ne peuvent apparaître qu'avec des niveaux élevés qui ne se présentent pas dans les conditions normales (MEYER-EPPLER). Cet auteur, poursuivant les travaux de SCHOUTEN (1 et 2), LICKLIDER et WINCKEL (5 et 6) montre des cas précis (disque). Il part d'une mélodie simple (gamme) de sons électroniques. Il supprime par filtrage toute la bande supérieure à 11 200 Hz, puis filtre



graduellement les fréquences basses en partant du fondamental jusqu'au 122^{ème} harmonique; or l'audition montre que l'impression de hauteur du fondamental subsiste même lorsqu'on a supprimé les 40 premiers harmoniques: seul le timbre de la note semble s'altérer; si on supprime les 7 premiers harmoniques, la différence est à peine sensible. LICKLIDER a montré que le phénomène est subjectif et qu'il provient d'un processus d'autocorrélation dans le système nerveux. SCHOUTEN a appelé ce fondamental subjectif: "fondamental résiduel" parce qu'il est déterminé à partir d'un résidu du spectre, dont les diverses composantes physiques ne sont pas directement analysables par l'oreille. Ce fondamental résiduel possède un caractère très particulier: il est incisif, perçant, alors que le fondamental objectif, sinusoïdal est doux et voilé.

b) Ce phénomène est connu empiriquement en lutherie et ses conséquences sont importantes. Il est utilisé chaque fois qu'on ne dispose pas d'une énergie suffisante à l'excitation pour donner au fondamental un niveau suffisant et aussi quand le système des résonateurs est physiquement incapable d'amplifier par résonance des fréquences assez graves (taille trop petite): dans ces conditions la sensation de fondamental subsiste bien, mais elle provient du fondamental résiduel et le timbre de l'instrument est alors de caractère particulier (incisif, perçant); on relève bien ces caractéristiques dans les pianos de petite taille et en général dans tous les instruments comportant une caisse de dimensions réduites et une tessiture relativement grave (archiluth, petits altos à cordes, gusla etc).

L'exemple du gusla est caractéristique à cet égard: nous avons montré le spectre de cet instrument à une fréquence de 440 Hz; le fondamental est de très faible niveau par rapport à l'harmonique 3 (au moins 20 dB de différence); on pourrait donc s'attendre à une sensation de hauteur correspondant à l'harmonique 3; or c'est bien le fondamental 440 Hz qui est perçu, mais le timbre est altéré (et typique des instruments de taille trop petite par rapport à leur tessiture).

Nous avons remarqué d'autres phénomènes qui relèvent probablement de la même explication: quand on équipe de cordes un violon qui vient d'être construit, celui-ci possède à l'origine un timbre légèrement cotonneux, voilé; ce timbre évolue assez rapidement et devient



graduellement plus clair. En effet, sous les contraintes dues à la tension des cordes, l'instrument se déforme; son élasticité de flexion décroît graduellement, le degré de liberté général du système diminue: le niveau des fréquences graves diminue graduellement, l'impression de fondamental subsiste, mais le timbre change et s'éclaircit parce que le fondamental subjectif résiduel prédomine graduellement. Les caractéristiques sonores des vieux violons s'expliquent probablement ainsi : l'explication purement physique est impossible: il s'agit d'un phénomène psychologique.

On pourrait multiplier ces exemples qui indiquent les limites de la "physique des instruments".

12) CRITIQUE GENERALE DE LA DOCTRINE ETABLIE : La doctrine qui résulte de nos recherches repose sur une appréhension statistique, ce qui résulte de l'existence d'un grand nombre de phénomènes connexes aux phénomènes essentiels. Exemple: les interactions entre divers phénomènes selon leur grandeur relative, les "accomodations" de mouvements vibratoires les uns sur les autres, les pertes d'énergie etc. Des recherches complémentaires systématiques sont donc nécessaires; elles sont possibles actuellement, le problème préalable de ramener la question à ses éléments étant résolu de façon suffisante.

22) LE MATERIEL : Le signal musical physique rayonné par les instruments de musique est essentiellement fluctuant; l'interprétation des phénomènes est sujette à de nombreuses restrictions relatives aux conditions psychologiques: pour cette raison les critiques d'imprécision que l'on peut adresser au matériel utilisé (sonagraphe, bathymètre, oscillographe) sont levées. Il est certain qu'une précision supérieure serait quelquefois désirable quand elle se traduit par une précision comparable du phénomène étudié, mais l'imprécision du matériel était compensée dans une certaine mesure par notre expérience personnelle d'instrumentiste, de luthier et de fileur de cordes. Beaucoup de points importants sont incomplètement étudiés en raison de la limitation de nos possibilités expérimentales.

32) LA TECHNIQUE EXPERIMENTALE : Elle ne s'est établie que peu à peu. Bien que nous soyons parti de l'idée qu'il fallait étudier



un générateur sonore tel que le violon de la même façon qu'on étudie un moteur électrique ou un générateur basse fréquence, il fallait résoudre ici des problèmes particuliers. Ainsi le microphone électromagnétique utilisé pour les premières séries de relevés s'est avéré trop peu sensible aux fréquences élevées; les premiers résultats sont donc insuffisants; il faudrait reprendre l'ensemble des enregistrements en systématisant encore davantage les expériences.

La normalisation des conditions d'excitation était difficile à réaliser, car il fallait s'écarter le moins possible des conditions normales du jeu de l'instrument. Nous avons réalisé un archet dont la mèche est un ruban de parchemin continu (vitesse de défilement, tension et pression facilement réglables et mesurables), mais tous les enregistrements au sonographe sont faits à l'archet normal: d'où les fluctuations erratiques des phénomènes; il est vrai que l'importance de ces fluctuations a été mise en évidence et précisée.

Nous avons été gêné quelquefois par la limite inférieure de sensibilité du sonographe (250 Hz); cette gêne devient considérable pour les instruments de tessiture grave (exemple: la guitare), car les raies spectrales sont alors trop serrées et difficiles à séparer. La technique d'enregistrement sur bande permet de remédier partiellement à cet inconvénient: il suffit d'augmenter la vitesse de défilement lors de l'analyse.

42) L'ETUDE EXPERIMENTALE DES PLAQUES est insuffisante; il faudrait reprendre avec des moyens modernes certaines expériences anciennes (Savart, Chladni etc) ce qui permettrait de dégager certaines lois de couplage qui n'ont jamais été précisées; on pourrait ainsi expliquer et justifier les constatations empiriques des luthiers et certains éléments de leur technique. Mais il faudrait au préalable étudier les phénomènes à l'aide de matériaux isotropes: ces études sont à l'état du projet.

52) STATISTIQUES : On a vu qu'en lutherie il est impossible de tirer des conclusions d'après des cas particuliers, en raison des variations continues et importantes des paramètres physiques des matériaux: la vérité en lutherie ne peut être que statistique.

Pour les cordes les relevés sont suffisants. Nous en avons étudié près d'un millier dont beaucoup fabriquées par nous-même.



Pour ce qui est des instruments, nos observations et travaux ont porté sur environ 50 instruments; 25 étaient fabriqués par nous. Parmi les autres se trouvait un violon qui avait remporté le premier prix à un concours international de lutherie devant 400 concurrents.

Certaines études restent à faire: par exemple la recherche des caractéristiques des instruments anciens (on sait que ceux-ci passent pour avoir une qualité supérieure, mais rien d'objectif ne semble avoir été fait dans ce domaine et nos travaux n'ont fait qu'effleurer la question 3 instruments anciens seulement, datant du 18^e siècle, ont été étudiés.

62) LE JEU INSTRUMENTAL : C'est une étude autonome; elle permet d'expliquer et de justifier la technique instrumentale des artistes et de préciser les grandeurs physiques en cause. L'enseignement instrumental se fait de façon empirique; il semble qu'on pourrait tirer d'une telle étude des bénéfices pédagogiques considérables. Le sonagraphe est précieux ici car il permet de faire la relation entre le langage des physiciens et celui des musiciens, l'absence d'un langage commun étant le principal obstacle au progrès en acoustique musicale.

En résumé :

12) On a étudié ici une classe d'instruments déterminée. La "physique" des instruments à cordes est insuffisante pour expliquer le phénomène musical; il faut tenir compte de phénomènes psychologiques (fondamental résiduel subjectif etc).

22) La doctrine établie est incomplète en raison de la complexité des phénomènes.

32) Le matériel est adapté (sonagraphe, oscillographe, enregistreur de niveau); sa précision est suffisante.

42) La technique expérimentale est au point, mais il faudrait reprendre certaines mesures et certaines études (plaques couplées etc).

52) Les statistiques suffisent pour ce qui concerne les cordes et les violons; il faudrait étudier systématiquement d'autres instruments typiques (guitare, harpe, piano etc).



2°) CONCLUSIONS :

Nous avons tenté dans ce travail de faire émerger les propriétés générales du violon et de divers autres instruments à cordes afin d'établir les éléments d'une théorie physique de la lutherie:

1°) Nous avons montré qu'une corde vibre de 5 manières différentes dont aucune n'est négligeable; chacun des modes vibratoires élémentaires est amplifié dans des proportions variables selon les conditions aux extrémités des cordes, le chevalet et d'une façon générale selon l'architecture de l'instrument. La somme de ces modes vibratoires détermine, avec la place de l'archet sur la corde, la forme de l'excitation.

Cette forme est modifiée par le système complexe de résonateurs couplés auquel elle est transmise. La forme ultime de la vibration globale est rayonnée par l'instrument.

2°) Nous avons défini les paramètres sensibles des cordes. Les modes élémentaires de vibration d'une corde sont régis par les équations de fonctionnement que nous fournit la physique. La qualité musicale d'une corde est fonction de la relation entre la fréquence fondamentale de la corde et les fréquences des modes secondaires; elle est déterminée par les paramètres sensibles. Nous avons montré à quelles grandeurs physiques les paramètres sensibles sont liés. La notion de paramètres sensibles est importante: ce sont eux qui apparaissent dans le spectre comme "formants".

3°) Les "formants" positifs ou négatifs, bosses ou trous dans un spectre de référence déterminé par la vibration transversale fondamentale et ses harmoniques (série de Fourier), déterminent la forme de l'enveloppe du spectre global rayonné par l'instrument; c'est cette forme qui est déterminante dans la qualité d'un instrument. Nous avons déterminé à partir de cette forme les éléments d'une métrologie du timbre. La fiche caractéristique d'un instrument précisera donc cette forme et donnera d'autres renseignements: niveau moyen et homogénéité de niveau entre les diverses notes de l'instrument.

4°) L'instrument, somme de résonateurs fixes, peut être défini par sa courbe de réponse, où chaque pointe correspond à un paramètre matériel de la structure de l'instrument.

A cette courbe de réponse on superpose l'excitation pour obtenir le spectre global de la note considérée; la forme de l'excitation se déplaçant sur l'échelle des fréquences alors que la courbe de réponse est fixe, on obtient pour chaque fondamental un spectre différent. Les invariants se manifestent au cours du jeu au travers des notes émises. Les transitoires permettent de reconnaître le type d'instrument en fonction du mode d'excitation, mais la qualité d'un instrument, à l'intérieur d'un type donné, est fonction de sa structure et du couplage corde-instrument. Celui-ci dépend essentiellement des conditions aux extrémités et du chevalet.

52) Généralisation : L'idée que nous avons dégagée, de multiplicité des modes vibratoires élémentaires du générateur de son, ultérieurement modifiée par un système de résonateurs, paraît devoir s'appliquer dans tous les cas où la structure de l'instrument répond de façon plus ou moins sommaire à la structure très générale des divers modes vibratoires qui nous a servi d'hypothèse de départ. On a d'une part une source excitatrice à spectre de raies très riche et d'autre part les éléments vibrants qui déforment ce spectre par résonance ou filtrage.

Dans tous les cas, les voies physiques permettent de préciser les divers modes vibrants et les paramètres sensibles corrélatifs, et de déterminer les relations d'optimum avec le système de résonateurs amplificateurs (instrument). Nous nous sommes concentrés dans cette étude sur les instruments à cordes, mais la doctrine établie est valable pour l'ensemble des instruments de musique.

62) Résultats : Du point de vue que le physicien peut avoir envers les instruments de musique, nous avons expliqué :

- pourquoi le violon s'est cristallisé dans sa forme actuelle;
- pourquoi le violon ne peut être géométriquement semblable au violoncelle ou à la contre-basse;
- pourquoi on ne peut utiliser un violon monocorde si on veut couvrir une partie importante de la gamme acoustique;
- pourquoi des mesures physiques faites sur cordes isolées sont insuffisantes pour connaître leur rendement musical sur un instrument
- pourquoi il n'existe pas de cordes universelles adaptables à tous les types d'instruments;

- pourquoi une corde n'atteint son rendement optimum qu'après une durée variable d'usage;
- pourquoi les conditions hygrométriques modifient le timbre et le rendement musical de la corde et de l'instrument;
- pourquoi la structure des instruments à cordes tels que le violon est dissymétrique par rapport à l'axe longitudinal de la table;
- pourquoi le violon amplifie à niveau sensiblement constant plus de 4 octaves $1/2$;
- pourquoi la courbe de réponse d'un instrument est insuffisante pour déterminer sa qualité musicale;
- pourquoi le spectre de chaque note d'un instrument à cordes est différent.

Nous avons montré, par ailleurs, comment se réalisait la synthèse du signal musical dans les instruments à cordes. Un but de cette étude était de préciser les rôles respectifs des responsables de cette synthèse; se sont :

1^a) Le fabricant de cordes qui détermine la forme de l'excitation en agissant sur les paramètres sensibles des cordes;

2^a) le luthier qui détermine la courbe de réponse de l'instrument;

3^a) l'instrumentiste qui agit dans une large mesure sur la forme de l'excitation et réalise la superposition excitation-courbe de réponse qui engendre la note instrumentale rayonnée. Le rôle de l'instrumentiste consiste essentiellement à introduire des fluctuations systématiques continuelles du signal musical sur les plans dynamique, harmonique et des tessitures, fluctuations qui caractérisent la musique instrumentale.

Ce travail a été effectué à partir d'études partielles commencées en 1942 sur la sonorité des instruments de musique à cordes. Il a été poursuivi avec nos propres moyens jusque vers 1956 avec l'aide bienveillante de M. Charles MAILLOT au laboratoire des Etablissements Babolat-MAILLOT-WITT de LYON, puis sous la direction scientifique de M. MOLES que nous sommes heureux de remercier ici pour l'intérêt qu'il nous a manifesté dès le début et pour les conseils qu'il nous a donnés dans la rédaction du présent travail.

Les recherches ont été poursuivies à partir de 1956 au laboratoire d'acoustique du CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS dirigé par M. CABARAT et au laboratoire de l'INRA dirigé par M. BUSNEL. Nous sommes heureux de les remercier de l'aide bienveillante qu'ils nous ont apportée en nous permettant d'utiliser leurs appareillages. Nous remercions également l'ASSOCIATION FRANCAISE DES FABRICANTS D'INSTRUMENTS DE MUSIQUE (AFIMA) pour l'aide matérielle qu'elle a apportée à l'impression de ce travail.

B I B L I O G R A P H I E

-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

par ordre alphabétique

-
- ARNS (U) : 1) - Untersuchungen an Geigen. Thèse Dr.Ing. à la Technische Hochschule KARLSRUHE 1955
2) - Eine neue Art objektiver Qualitätsfeststellung von Geigen. Gravesaner Bl. 7-8 (1957) p. 92
- BACKHAUS (H) : - Ueber Resonanzeigenschaften von Streichinstrumenten. Ak.Zeitsch. I/S (1936) p. 179
- BAGATELLA (A) : - Regole per la costruzione dei violini. Memorie presentata alla Academia di Scienze, lettere et Arti di Padova 1782
- BARKECHLI : - Quelques idées nouvelles sur la consonance. Ac. Musicale, Ed. CNRS Paris 1959
- BECQUEREL (J) : - Cours de physique: Elasticité, Acoustique Hermann 1926
- BLADIER (B) : 1) - Sur la vitesse de vibration des cordes filées sur boyau. C.R. Ac. des Sc. T. 238 (1954) p.570
2) - Sur la caisse sonore, l'âme et le chevalet du violoncelle. CR Ac. Sc. T. 245 (1957) p. 791
3) - Nouvelle étude sur la vibration des cordes dans les instruments de musique. J. Phys.Rad.T.I5 (1954)66
4) - De l'influence de la vitesse et de la pression de l'archet sur la vitesse de vibration des cordes filées. C.R. Ac.Sc. T. 240 (1955) p. 1868
5) - Nouvelles recherches concernant la vibration de cordes de violoncelle. J.Phys.Rad.T.I6 (1955) p. 108
6) - Evolution des phénomènes transitoires dans la mise en vibration des cordes. J.Phys.Rad. T. 17 (1956) p. 57
7) - Contribution à l'étude du violoncelle. Ac. Music. Ed. CNRS Paris 1959

- BOUASSE (H) : 1) - Cordes et membranes. Delagrave 1926 Paris
2) - Verges et plaques. Cloches et carillons. Delagrave Paris 1927
3) - Tuyaux et résonateurs. Delagrave Paris 1929
- BRILLOUIN (J) : - Reflexions sur les problèmes d'acoustique musicale. Ac.Music. Ed. CNRS Paris 1959
- BRINER (H) : - Notiz über die unterschiedliche Wirkung der Schallabsorption auf den Klang von neuen und alten Geigen. Experimentia, Birkhauser T. VII.2 1951
- BRUHAT (G) : - Physique générale: Mécanique. Masson Paris 1955
- CABARAT (R) : 1) - Mesure des constantes élastiques des matériaux par un procédé acoustique. C.R.Ac.Sc. T. 213 (1941) p. 231
2) - Nouvelle méthode dynamique de mesure du module d'élasticité et de la capacité d'amortissement VDI Berichte T.8 (1956) p.156
- CABOS (F) : - Le violon et la lutherie. Grund Paris 1948
- CHARRON : - Théorie de l'archet, Thèse. Gauthier Villars Paris 1916
- CHENANTAIS (J) : - Le violoniste et le violon. Durand, Nantes 1927 (contient un intéressant compte-rendu des concours de sonorité de violons et violoncelles anciens et modernes)
- DEMENY : - Physiologie des professions: le violoniste. Ed. Maloine Paris 1905
- FETIS (F.J.) : - Stradivarius. Sagot, Paris 1856
- FINE (E) : - Dynamic methods for determining the elastic constants and their temperature variation in metals. Am.Soc. for testing materials New-York 1952
- GREENE (P) : - Violin performance with the reference to tempered, natural and pythagorean intonation. Univ. Iowa Studies in psych. of music. 4 (1937) 232

- GREILSAMER (L) : 1) - Le vernis de Crémone. Sté Fr. d'Imp. Paris 1908
2) - L'hygiène du violon. Delagrave Paris 1910
3) - Anatomie et physiologie du violon. Delagrave Paris 1924
- GRILLET (L) : - Les ancêtres du violon. Schmitt Paris 1901
- GRUETZMACHER (M) : 1) - Das Teiltonspektrum einer Glocke. Graves. Blät. 13 (1959) p. 124
2) - Le spectre d'un son de cloche. Ac. Music. CNRS, Paris 1959 p. 239
- HAMMA (F) : - Meisterwerke italienischer Geigenbaukunst. Hamma, Stuttgart 1932
- HART (G) : - Le violon. Schott Paris 1886
- HILL (H.A.A.) : - Antonio Stradivarius. Hill, London 1908
- KAUL (P) : - La querelle des anciens et des modernes. Kaul, Nantes 1927
- KELLER (F) : - Beitrag zur Nachbildung des menschlichen Gehörs im Rahmen raumakustischer Modellversuche Grav. Bl., N° 10 p. 72 (1958)
- KUENZI (E.W.) : - Methods for determining the elastic constants of non metallic materials. Am. Soc. for testing materials; New York 1952
- LEIPP (E) : 1) - Aspects du problème des gammes instrumentales Mus. et Rad. Paris Oct. 1958
2) - Le module d'élasticité et la masse spécifique: paramètres sensibles du spectre d'une corde harmonique. C.R. Ac. Sc. T. 248 (1959) p. 3278
3) - Le module de rigidité et la tension par unité de surface de la section: paramètres sensibles du rendement musical d'une corde harmonique. C.R. Ac. Sc. T. 249 (1959) p. 375
4) - La vibration d'Octave, paramètre sensible dans les spectres des instruments à cordes. C.R. Ac. Sc. T. 249 (1959) p. 1474

LEIPP (E)

- : 5) - Le degré hygrométrique de l'air ambiant, paramètre sensible du spectre d'une corde harmonique de boyau. C.R.Ac.Sc.
- 6) - Essai sur la lutherie. In 8, 90 p. Millant Paris 1945
- 7) - La sonorité du violon, de l'alto, du violoncelle. In 8, 46 p. Millant Paris 1952
- 8) - Etude sur les origines du violon. Mus. et Rad. Avril, Juin, Juillet Paris 1953
- 9) - Le violon et le nombre d'Or. Mus.Rad. Oct. 1954 Paris
- 10) - l'homogénéité de niveau du violon. Mus.Rad. Janvier 1956 Paris
- 11) - Aspects physiques du problème du vernissage des instruments. Mus.Rad. Mars 1959 Paris
- 12) - Le violon de Savart. Mus.Rad. Juin 1959 Paris
- 13) - La synthèse du spectre des cordes harmoniques Das Musikinstrument. Francfort Avril 1960

LEIPP (E) - MOLES (A)

- : I) - L'emploi du sonographe dans la détermination de la qualité des instruments à cordes. Communication présentée au Groupement Académique de Langue Française, Lausanne, Sept. 1958. Annales des Télécommunications. Tome 14 N° 5-6 (1956) p.135
- 2) - Méthode objective d'appréciation des qualités d'un instrument à cordes. Comm. au Congrès International d'Acoustique, Stuttgart, Sept. 1959 (Elsevier, Amsterdam 1960)

LICKLIDER (J.C.R.)

- : - Auditory Frequency Analysis -in CHERRY-Information Theory London 1956 (C.F. WINCKEL 5)

LOTTERMOSER (M.W.)

- : I) - Orgelneubau auf akustischer Grundlage. Grav. Bl. N° 11-12 (1958) p. 131
- 2) - L'examen acoustique des violons dans la Physikalische-Technische Bundesanstalt. Ac.Mus. CNRS (1959) p. 185

- MAHILLON (V.C.) : - Eléments d'acoustique musicale et instrumentale. Mahillon, Bruxelles 1874
- MAILLOT (Ch.) : - La fabrication des cordes harmoniques. Manuel du luthier. Larousse Paris 1952
- MEINEL (H.) : 1) - Frequenzkurven von Geigen. Ak.Zeitsch. 2 (1937) p. 185
2) - Akustische Eigenschaften von Geigen verschiedener Qualität. Ak.Zeit. 4 (1939) p. 89
3) - Zur schalltechnischen Prüfung der klanglichen Qualität von Geigen. Zeitsch. für technische Physik 10 (1938) p. 297
4) - Regarding the sound quality of violins and a scientific basis for violin construction. Journ.Ac.Soc.Am. 29 (1957) p. 817
- MERSENNE : - Harmonie Universelle, Edition fr. Cramoisi et Ballart 1636-1637
- MEYER (E) et BUCHMANN : - Die Klangspektren der Musikinstrumente Berlin 1931
- MEYER-EPPLER (W),
SENDHOFF (H) et
RUPPRATH (R) : - Residualton und Formantton. Grav.Bl. N° 14 (1959) p. 70
- MILLANT (R et M) : - Manuel pratique du luthier. Larousse Paris 1952
- MOLES (A) : 1) - Pourquoi deux violons font-ils plus de bruit qu'un seul ? Journ.Phys.Rad. T.10, VIII (1949) p. 194
2) - Etude et représentation de la note complexe en acoustique musicale. Ann.Telec. T.7/II (1952) p. 430
3) - Structure physique du signal musical et phonétique. Thèse Sorbonne 1952
4) - L'emploi du spectrographe acoustique et le problème de la partition en musique expérimentale. Ann.Telec. T.12, 9 (1957) p. 299

- MOLES (A) : 5) - Physique et Technique du bruit. Dunod Paris 1952
- MUNOZ (R) : - Tecnologia de la guitarra argentina. Buenos Ayres 1952 (contient une intéressante étude des bois sud-américains)
- PASQUALINI (G) : 1) - L'étude électroacoustique de la caisse harmonique (Congrès Int.d'Electroac. DELFT 1953)
 2) - Nuovi risultati nello studio della cassa armonica. La Ric. Sc. 1943 p.III
 3) - Relazione sulle prove per addivenire ad una valutazione obbiettiva della qualita acustiche di alcuni violini. Ric.Sc. XVIII (1940) p. 622
- PASQUALINI (G),
BARDUCCI (I) : Misura dell'attrito interno et delle costanti elastiche del legno. Nuovo Cimento T.5 N° 5 (1948) p. 416
- PELUZZI (E) : 1) - Antonio Stradivari ha parlato. Ed. Bocca Milano 1941
 2) - Anima et catena. Bocca Milano 1946
- PIMONOV (L) : 1) - Contribution à l'étude de problèmes de la sélectivité tonale de l'oreille. Rev.Laryng. N° 1-2 1959 p. 78
 2) - La détermination de la qualité des instruments de musique au moyen du spectre sonore transitoire. Ac.Music. CNRS Paris 1959
- PINCHERLE (M) : - Les instruments du quator. Presses Univ. de France 1948
- POTTER (R.K.) and
PETERSON (G.E.) : - The representations of vowels and their movements. Journ.Ac.Soc.Am. T.2 (528) 1948
- PRAETORIUS : - Syntagmatis Musici-Organographia. Wolfenbuttel 1618 (réédition Trautwein, Berlin 1884)
- RAMAN : - Handbuch der Physik. Springer Berlin 1927

- RICHARDS (J.T.) : - An evaluation of several static and dynamic methods for determining elastic moduli. Am.Soc. for Test.Mat. New York 1952 p. 71
- RIMSKI-KORSAKOV (A.V.) : - Les recherches sur le timbre des violons et guitares et sur l'excitation des vibrations d'une anche d'harmonium. Ac.Music. CNRS 1959 p. 203
- RITTER (H.) : - Die viola alta oder Altgeige. Merseburger Leipzig 1885
- ROHLOFF (E.) : - Ueber die innere Reibung und Strahlungs-dämpfung bei Geigen. Ann. der Phys. 38 (1940) p. 177
- ROUSSEL (A.) : - Traité de lutherie. Ed. Durand Paris 1956
- SAUNDERS (F.A.) : 1)- The mechanical action of violins. Journ. Ac. Soc.Am. 9 (1937) p. 81
2)- Recent work on violins. Journ. Ac.Soc. Am. 25/3 (1953) p. 491
- SAVART (F.) : - Mémoire sur la construction des instruments à cordes et à archet. Suivi d'un rapport sur ce mémoire, fait à l'Académie des Sciences et des Beaux Arts (rapporteur Biot). Deterville Paris 1819
- SCHAEFFER (P.) - MOLES (A): - A la recherche d'une musique concrète. Ed. du SEUIL Paris 1952
- SCHOUTEN (J.F.) : 1)- Residuentheorie. Philipps Technische Rundschau. 5 (1940) p. 294
2)- Zur Tonhöhenempfindung (en collaboration avec B. Lopez Cardozo); Communication 3N6: Congrès internat.d'Acoustique, Stuttgart 1959
- SCHUEGERL (K.) : - Die Rolle des Gehörsorgans im Aufbau der Musik. Grav.Bl. 13 (1959) p. 2

- SCHULZ (C.) : - Stradivaris Geheimnis. Füssinger Berlin 1901
- SEASHORE (C.) : - Psychology of music. Mc.G.Hill NEW YORK 1938
- SKUDRZYK (E.) : 1) - Die Bedeutung der Ausgleichvorgänge für die Musik und Tonübertragung. Elektrotech. u. Maschinenbau 67 (9 et 10) 1950
2) - Betrachtungen zum musikalischen Zusammenklang. Congrès Int.d'Electro-ac. DELFT 1953 p. 249
3) - Psychoakustische Erscheinungen bei der Bildung von natürlichen und synthetischen Klängen (Grav.Bl. 9 1957) p. 75
- STEINER (K.) : - Die geometrische Konstruktion der Geigenform von Stradivari. Instrumentenbau Zeitsch. 9 (1949)
- STEVENS and DAVIS : - Hearing. Wiley London 1938
- TOLBECQUE (A.) : - L'art du luthier. Mercier. Niort 1903
- TRAUTWEIN (F.) : - Probleme des Hörens. Grav. Bl. 7-8 (1957) p. 67
- VAN ESBROEK et MONFORT : - Qu'est-ce que jouer juste ? Lumière Bruxelles 1948
- VANNES (R.) : - Essai d'un dictionnaire universel des luthiers (donne un aperçu intéressant sur le rôle des violons anciens et leur copie)
- WINCKEL (F.) : 1) - Klangwelt unter der Lupe. Max Hesse Berlin 1952
2) - Die Kunst des Geigenbaues. Voigt Berlin 1954
3) - Die Bedeutung des Vibrato in der Musik (Grav.Bl. 6 (1957) p. 40
4) - Das Ohr als Zeitmessorgan. Grav.Bl. 9 1957 p. 83

WINCKEL (F.)

- : 5) - Influence des facteurs psycho-physiologiques sur la sensation de consonance-dissonance. Ac.Mus. CNRS Paris 1959
- 6) - Die subjektive Bewertung des Residuums. Comm. au Congrès International d'Acoustique, Stuttgart 1959 (à paraître chez Elsevier Amsterdam)

YOUNG (R.W.)

- : 1) - Inharmonicity of plain wire piano strings. Journ. Ac.Soc.Am. 24/3 (1952) p. 267
- 2) - The tuning of musical instruments. Instit. of Music.Instr.Technology 1953
- 3) - Influence of humidity on the tuning of a piano (Journ. Ac.Soc.Am. 21/6 (1949) p. 580
- 4) - Sur l'intonation de divers instruments de musique du US Navy Electronics Laboratory San Diego. Ac.Music. CNRS Paris 1959

YOUNG (R.W.) and
WEBSTER (J.C.)

- : - Die Innenstimmung von Musikinstrumenten. Grav.Bl. II/12 (1958) p. 175.

D E U X I E M E T H E S E

Propositions données par la Faculté

" L'étude au Spectrographe acoustique des signaux émis
par les animaux ".

Vu et approuvé :

Paris, le 15 Mai 1960

Le Doyen de la Faculté des Sciences ,

J. PERES

VU

et Permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie
de Paris,

Jean SARRAILH

